

**Das Physikalische Optimum als Basis von Systematiken
zur Steigerung der Energie- und Stoffeffizienz
von Produktionsprozessen**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Dirk Volta
aus Kaltenkirchen

genehmigt von der
Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal,

Tag der mündlichen Prüfung
05. Dezember 2014

Dekan:	Prof. Dr. rer. pol. W. Pfau
Vorsitzender der Promotionskommission:	Prof. Dr.-Ing. D. Goldmann
Erster Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. O. Carlowitz
Weitere Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. B. U. Sankol
	Prof. Dr.-Ing. V. Wesling

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Clausthal, 05. Dezember 2014

Dirk Volta

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird das „Physikalische Optimum“ PhO als idealer Referenzprozess zur Bewertung technischer Prozesse definiert und auf naturwissenschaftliche Probleme, primär im Bereich der Thermodynamik, angewendet. Der Vorteil, den realen Prozess mit dem Physikalischen Optimum zu vergleichen, ist, dass der Referenzpunkt (das PhO) nicht unterschritten werden kann, solange die physikalischen Gesetze gelten. Somit ist ausgeschlossen, dass zu einem späteren Zeitpunkt, zu dem der Stand der Technik fortgeschritten ist, ein neuer Referenzpunkt bestimmt werden muss. Als Beispiel für diese Problematik seien die Effizienzklassen von Elektromotoren genannt, welche im Zuge des Technikfortschritts neu definiert werden mussten. Das Physikalische Optimum ist dagegen für einen bestimmten Prozess ultimativ.

Eine wesentliche Anwendung des Physikalischen Optimums wird anhand der in dieser Arbeit entwickelten, erweiterten Verlustkaskade veranschaulicht. Das Physikalische Optimum – als letzter Schritt der Verlustkaskade – ist eine Erweiterung zu der gängigen, aus der Literatur bekannten Darstellung (Primärenergie → Endenergie → Nutzenergie). Der physikalisch optimale Verbrauch ist der Teil der Nutzenergie, welcher unter physikalisch optimalen Bedingungen erforderlich ist. Der übrig bleibende Anteil der Nutzenergie ist dementsprechend jener Anteil, welcher nach den Randbedingungen der Physik als Verlust zu betrachten ist. Die Bewertung des Herstellprozesses eines Schokoladenproduktes zeigt im Rahmen der Validierung die erweiterte Verlustkaskade und veranschaulicht alle auftretenden Verluste von der Primärenergie bis zum PhO. Eine Schwierigkeit ist hierbei, die Vergleichbarkeit aller unterschiedlichen Energieformen (Kälte, Druckluft, Wärme) herzustellen und daraus ein Gesamtbild zu erstellen. Das Bilden einer äquivalenten Einheit löst dieses Problem.

Die in dieser Arbeit entwickelte Bewertungsgröße ist der PhO-Faktor, welcher das Verhältnis des realen Verbrauches zum physikalisch optimalen Verbrauch (Bedarf) darstellt. Der PhO-Faktor ist im physikalischen Optimalfall gleich eins. Im Rahmen der Validierung wird anhand einer Nahrungsmittelfabrik gezeigt, wie der Werkwasserverbrauch einer Produktionsfabrik innerhalb von 6 Jahren um etwa 60 % reduziert wird. Der PhO-Faktor verringert sich dadurch von 5,1 auf 2,0. Der PhO-Faktor der optimierten Fabrik von 2,0 zeigt das verbleibende maximale Potential für verbleibende Optimierungsschritte.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Bewertung des dynamischen Verhaltens produktionstechnischer Anlagen. Somit wird auch die Nutzungsphase eines Prozesses (instationärer Betrieb) bewertet. Es resultieren zwei wesentliche Ergebnisse:

1. Die Gesamtbetrachtung liefert eine übersichtliche Gesamtdarstellung des Physikalischen Optimums, der bereits optimierten Verbräuche sowie des verbleibenden Potentials für weitere Optimierungen. Das Ergebnis ist eine Darstellung vom Bereitschaftsbetrieb bis hin zur Nennleistung des Prozesses.
2. Zur Darstellung und Bewertung der Effizienzsteigerung von Prozessen können die Verbräuche als Funktionen (vor und nach der Effizienzmaßnahme) miteinander verglichen werden. Die funktionale Bewertung von Verbräuchen hat den Vorteil, dass die Auslastung der Produktion keinen Einfluss mehr auf das Ergebnis der abschließenden Vergleichsbewertung hat.

Abstract

This doctoral thesis defines the Physical Optimum (PhO) as the reference process to evaluate technical processes and scientific problems, focusing thermodynamic specializations. Considering the laws of physics, the advantage of comparing a real process with a reference which bases on its physical energy requirements (PhO) is that it is impossible to fall below this theoretical value by future assessment criteria. As an actual case in point, standard motors with different continuously updated efficiency classifications are a practical example. In contrast to this the Physical Optimum is an ultimate reference-process which always maintained constantly for one specific process and hence there is no need of a redefinition for a reference-process.

The main function of the Physical Optimum can be demonstrated as the last instance of energy cascades which identify the physical energy requirements, for instance of a production process. The actual model of energy cascades is restricted to energy conversion along the transformation chain from primary energy to usable energy. An extended energy cascade with the Physical Optimum as the last instance is a new approach and hence an important difference to the known representation-models in the literature. This consideration defines energy consumptions which are not necessary for the specific physical energy requirement of one process as energy losses. This approach is illustrated during a chocolate manufacturing process. Basic foundation and sine qua non for necessary comparability is the definition of an energy equivalent basis for all used energy forms (compressed air, thermal- and cooling-energy).

The developed quantifying parameter is the PhO-factor which quantifies the ratio of the actual consumption and the physical energy demand of one process. Hence, the optimal physically process is evaluated with the PhO-factor value of one.

As part of the validation the water reduction will be demonstrated. It was possible to reduce the water consumption of a food factory by 60% over the past six years. The consequence is a reduced PhO-factor from 5.1 to 2.0 which at once illustrates the maximum remaining potential for further process optimization.

Another focus point of this doctoral thesis is the evaluation of the dynamic behavior of production processes, hence the transient operation of implementation phases. This approach indicates two essential evaluation results:

1. The overall analysis ensures a clear overview of the Physical Optimum, the optimized consumption as well as the remaining potential for optimization. The result provides a comfortable representation from baseload-operation mode of the process to its classified nominal capacity.
2. Resultant enhanced process-efficiencies can be presented and evaluated in form of consumption functions in direct before-and-after comparisons. The advantages of this type of processes evaluation is that the final results and research on benchmarking has no influence on its level of capacity utilization.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	V
Abstract	VII
Abkürzungen	XII
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XV
Formelzeichen	XVI
1 Einleitung	1
2 Stand der Wissenschaft	3
2.1 Leitfaden Energieeffizienz in der Süßwarenindustrie	3
2.2 Ansatz von BINDING	3
2.3 Ansatz von DRUMM	7
2.4 Ansatz von ENGELMANN	10
2.5 Ansatz von FRESNER	13
2.6 Ansatz von PÜSCHEL	16
2.7 Energiemanagementsysteme	17
2.7.1 Ziel der Norm DIN EN ISO 50001	17
2.7.2 Politischer Hintergrund	17
2.7.3 Prozesse im Managementsystem und Schnittstellen	18
2.8 Ansatz von THIEDE	20
2.9 Ansatz von ERLACH	22
2.10 Zusammenfassung und Abgrenzung zur eigenen Arbeit	23
3 Grundlagen	25
3.1 Energie- und Stoffeffizienz	25
3.1.1 Effizienzbewertung durch Messungen auf Werkbilanz	25
3.1.2 Effizienzbewertung projektspezifisch auf Werkbilanz	27
3.2 Primärenergetische Bewertung	28
3.3 Spezifische Wärmekapazität von Lebensmitteln	30
4 Das Physikalische Optimum	31
4.1 Definition	32
4.2 Eigenschaften	33
4.3 Berechnung	35
4.4 Abgrenzung zum Betriebswirtschaftlichen Optimum	37
4.5 Anwendungen	38
4.5.1 Elektromotoren	38
4.5.2 Wärmeübertrager	39

4.5.3	Adiabate Systeme	42
4.5.4	Kälteerzeugung.....	43
4.5.5	Wärmeerzeuger	49
4.5.6	Drucklfterzeugung.....	53
4.5.7	Rückkühlwerk	55
5	Systematiken.....	57
5.1	Bestandsprozess.....	58
5.1.1	Messung oder Simulation als Grundlage der Bewertung	58
5.1.2	Erweiterte Pareto-Analyse.....	60
5.2	Potentialanalyse.....	61
5.3	Bilanzierung unterschiedlicher Energieformen.....	63
5.3.1	Berechnung.....	65
5.3.2	Systematik	66
5.3.3	Verlustfaktoren und Ableitung der Optimierungsstrategie	67
5.4	Kopplungsprozesse.....	68
5.5	Bewertung dynamischer Verluste.....	71
5.5.1	Wirkungsgrad und Nutzungsgrad.....	74
5.5.2	Der normierte Aufwand	76
5.5.3	Erläuterung am Beispiel eines elektrischen Verbrauchers	80
5.5.4	Systematik zur Darstellung des dynamischen Verhaltens.....	82
5.5.5	Fazit.....	84
5.6	Auswertung mittels Verlustkaskade.....	85
5.7	Ableitung der Handlungsmotivation	86
5.8	Handlungssystematik für Planung und Betrieb	87
6	Validierung	89
6.1	Wasserverbrauch einer Fabrik.....	90
6.1.1	Bestandsprozess	90
6.1.2	Verlustkaskade und Physikalisches Optimum	92
6.1.3	Ableitung der Handlungsmotivation	94
6.1.4	Untersuchung des dynamischen Verhaltens.....	95
6.2	Herstellprozess eines Produktes.....	97
6.2.1	Beschreibung des Herstellprozesses.....	97
6.2.2	Beschreibung des physikalisch optimalen Prozesses	100
6.2.3	Gesamtbilanzierung der verschiedenen Energieformen	102
6.2.4	Bewertung des Ergebnisses und Ansatz zur Optimierung	103
7	Schlussbetrachtung.....	105
7.1	Zusammenfassung.....	105
7.2	Ausblick.....	106
8	Literaturverzeichnis.....	107

Anhang 111

A 2	Bewertung der Technischen Medien	114
A 2.1	Kälteerzeugung	114
A 2.2	Wärmeerzeugung	115
A 2.3	Drucklufterzeugung.....	116
A 3	Grenzwertbetrachtung für Aufwandszahl und Nutzungsgrad	117
A 4	Unterlagen zur Validierung (Werkwasserverbrauch)	118
A 5	Unterlagen zur Validierung (des Produktionsprozesses)	119
A 5.1	Spezifische Wärmekapazität von Rohstoffen	119
A 5.2	Ursprünglicher Bestandsprozess	120
A 5.3	Messergebnisse (exemplarisch).....	121
A 5.4	Detailrechnung – Schritt 1 der Systematik aus Kapitel 5.3.....	122
A 5.5	Berechnen der Verlustkaskade	124
A 5.6	Auswertung Nutzenergieverbrauch (dynamisch)	129
A 5.7	Auswertung Primärenergieverbrauch (dynamisch).....	130

Abkürzungen

AZ.....	Aktueller Zeitraum
BHKW.....	Blockheizkraftwerk
BMBF.....	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BZ.....	Bezugszeitraum
bzgl.	bezüglich
ca.	circa
d. h.....	das heißt
DIN.....	Deutsches Institut für Normung
Dyn.....	dynamisch
EEG.....	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EKP.....	externer Kopplungsprozess
EnMS.....	Energiemanagementsystem
FU.....	Frequenzumformer
i.d.R.....	in der Regel
IKP.....	interner Kopplungsprozess
KPI.....	Key-Performance-Indikator
KWK.....	Kraft-Wärme-Kopplung
LCC.....	Lebenszykluskosten (Life Cycle Costs)
NEP.....	Nominal erwartete Produktionsmenge
Opt.....	Optimiert
PBP.....	Pay-back-Periode
PDCA.....	Plan-Do-Check-Act
PhO.....	Physikalisches Optimum
SdT.....	Stand der Technik
SLL.....	spezifische Linienleistung
TEP.....	tatsächliche erzeugte Produktionsmenge
TM.....	Technisches Medium
vgl.....	vergleiche

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Arbeitsinhalte von BINDINGS Methode (eigene Darstellung nach [6]).....	4
Abbildung 2-2: Potentiale und Strategien bei BINDING (eigene Darstellung nach [6])	5
Abbildung 2-3: Energieeinsatz bei BINDING (eigene Darstellung nach [6]).....	6
Abbildung 2-4: Typisches Energieeinsparungs-Portfolio (eigene Darstellung nach [15])	8
Abbildung 2-5: STRUCTese®-Energieverlustkaskade (eigene Darstellung nach [15]).....	9
Abbildung 2-6: Spezifischer Verbrauch über der Auslastung (eigene Darstellung nach [15])	9
Abbildung 2-7: Umfrageergebnisse zu Planungsprioritäten (eigene Darstellung nach [19])	10
Abbildung 2-8: Handlungsansätze und Fertigungssystem (eigene Darstellung nach [19])	11
Abbildung 2-9: ENGELMANN'S Methode (eigene Darstellung nach [19])	11
Abbildung 2-10: Regelkreis zur Datengenerierung (eigene Darstellung nach [19]).....	12
Abbildung 2-11: Strategien von Cleaner Produktion (eigene Darstellung nach [23])	13
Abbildung 2-12: Fischgrätendiagramm (eigene Darstellung nach [23]).....	15
Abbildung 2-13: Prozesse im Managementsystem (eigene Darstellung nach [7])	18
Abbildung 2-14: Modell eines Energiemanagementsystems (eigene Darstellung nach [12])	19
Abbildung 2-15: Kostensenkung durch ein EnMS (eigene Darstellung nach [8]).....	19
Abbildung 2-16: Energie-Portfolio (eigene Darstellung nach [51]).....	20
Abbildung 2-17: Stand der Wissenschaft und Abgrenzung zur eigenen Arbeit	23
Abbildung 2-18: Lebenszyklus eines Produktionsprozesses.....	24
Abbildung 3-1: Spezifische Messung auf Werkbilanz (Beispiel einer Fabrik 2007–2013).....	26
Abbildung 3-2: Prozessoptimierung bei gleichzeitigem Mehrverbrauch benachbarter Prozesse	27
Abbildung 3-3: Energieformen (modifiziert nach [6]).....	28
Abbildung 3-4: Materialformen (modifiziert nach [6]).....	28
Abbildung 4-1: Ableiten des Physikalischen Optimums (PhO) aus den Naturwissenschaften	32
Abbildung 4-2: Das Physikalische Optimum im Vergleich zu bekannten Referenzprozessen.....	34
Abbildung 4-3: Bilanzierter Gesamtprozess mit Teilprozessen.....	35
Abbildung 4-4: Physikalisches Optimum PhO und Betriebswirtschaftliches Optimum BwO	37
Abbildung 4-5: Effizienzklassen für 4-polige Elektromotoren (in Anlehnung an [10])	38
Abbildung 4-6: Bilanz eines Wärmeübertragers (in Anlehnung an [4])	39
Abbildung 4-7: Betriebscharakteristik von Wärmeübertragern (auf Basis von [4])	40
Abbildung 4-8: Wärmeübertrager am Beispiel einer Kältemaschine.....	41
Abbildung 4-9: Temperaturverlauf in einer physikalisch optimal isolierten Rohrleitung	42
Abbildung 4-10: Fließschema eines Kältemaschinenprozesses	43
Abbildung 4-11: Carnotprozess der Kältemaschine im T-s-Diagramm (modifiziert nach [9])	45
Abbildung 4-12: Leistungszahl (nach Carnotprozess) der Kältemaschine über t_c und t_0	45
Abbildung 4-13: Messgrößen zur Bewertung eines Kälteversorgungssystems	47
Abbildung 4-14: Energieverlustkaskade einer Kälteversorgungseinheit	48
Abbildung 4-15: Blockschaltbild eines physikalisch optimalen Wärmeerzeugers	49
Abbildung 4-16: Temperaturverlauf im Wärmeübertrager des Wärmeerzeugers.....	50
Abbildung 4-17: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad (in Anlehnung an [55], [56])	51
Abbildung 4-18: Blockschaltbild eines Druckluftverdichtungsprozesses.....	53
Abbildung 4-19: Physikalisch optimaler Energieverbrauch eines Verdichters (vgl. [22])	54
Abbildung 4-20: Blockschaltbild eines Verdunstungssystems	55
Abbildung 4-21: Nachgespeiste Wassermenge ($n = f(v, E)$) (modifiziert nach [44])	55
Abbildung 5-1: Übergeordnete Systematik	57
Abbildung 5-2: Möglichkeiten von Messungen (Qualität und Aufwand).....	58
Abbildung 5-3: Rechtfertigung der Mehrkosten für Messtechnik	59
Abbildung 5-4: Erweiterte Pareto-Analyse (fiktives Beispiel)	60
Abbildung 5-5: Physikalisches Optimum und absoluter Verbrauch	61
Abbildung 5-6: Priorisieren nach Physikalischen Optima und Verbräuchen.....	62
Abbildung 5-7: Erweiterte Verlustkaskade eines Technischen Mediums.....	64
Abbildung 5-8: Systematik zur primärenergetischen Bewertung eines Produktionsprozesses.....	66
Abbildung 5-9: Prozesskopplung	68
Abbildung 5-10: Einfacher Druckluftverdichtungsprozess mit anschließender Kühlung.....	68

Abbildung 5-11: IKP, EKP, PKK bei der Druckluftverdichtung mit anschließender Kühlung	69
Abbildung 5-12: Pinch-Point-Methode am Beispiel einer Wärmerückgewinnung.....	70
Abbildung 5-13: Methode der Speicherung zur Realisierung von Kopplungsprozessen.....	70
Abbildung 5-14: Statische und dynamische Verluste eines Prozesses.....	71
Abbildung 5-15: Druckluftleckage als durchgängiger Verlust (Fall A).....	72
Abbildung 5-16: Elektrische Antriebe als Verluste während Stillstandsphasen (Fall B).....	73
Abbildung 5-17: Spezifischer Energieaufwand in Abhängigkeit von der Produktionsauslastung...	75
Abbildung 5-18: Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Produktionsauslastung.....	75
Abbildung 5-19: Der normierte Aufwand in Produktionsprozessen (modifiziert nach [46])	76
Abbildung 5-20: Normierter Aufwand w_{auf} (nach [46])	77
Abbildung 5-21: Steigung des spezifischen Verbrauches bei Überlast.....	78
Abbildung 5-22: Das Physikalische Optimum als Funktion f_{phO}	78
Abbildung 5-23: Aufwandszahl und Nutzungsgrad im physikalischen Optimalfall.....	79
Abbildung 5-24: Normierter Aufwand am Beispiel eines elektrischen Verbrauchers	80
Abbildung 5-25: Stromlastgang einer Fabrik	81
Abbildung 5-26: Systematik zur Darstellung des dynamischen Verhaltens	82
Abbildung 5-27: Optimierungsfunktion f_{Opt}	83
Abbildung 5-28: Beispielhafte Ergebnisdarstellung des dynamischen Verbrauches	84
Abbildung 5-29: Verlustkaskade (vom Brownfield zum Physikalischen Optimum).....	85
Abbildung 5-30: Handlungsmotivation zum Optimieren.....	86
Abbildung 5-31: Handlungsanweisung zur systematischen Optimierung im Bestand	88
Abbildung 6-1: Prozesshierarchien der betrachteten Fabrik	89
Abbildung 6-2: Sankey-Diagramm des Wasserverbrauchs einer Produktionsfabrik	90
Abbildung 6-3: Pareto-Diagramm für den Wasserverbrauch einer Fabrik	92
Abbildung 6-4: Verlustkaskade für den Werkwasserverbrauch einer Fabrik	93
Abbildung 6-5: Handlungsmotivation nach der Optimierung (Zustand: 2013)	94
Abbildung 6-6: Dynamische Darstellung des Wasserverbrauches einer Fabrik	95
Abbildung 6-7: Optimierung und Potential des Wasserverbrauches einer Fabrik	96
Abbildung 6-8: Dynamischer Wasserverbrauch einer Fabrik (Aufwandszahl)	96
Abbildung 6-9: Prozessfließbild eines Schokoladenherstellprozesses – Portionierer	98
Abbildung 6-10: Prozessschritte des physikalisch optimalen Herstellprozesses	101
Abbildung 6-11: Erweiterte Verlustkaskade des Produktionsprozesses (Einheit: kWh / t_{PN}).....	102
Abbildung 6-12: SuperNova Energy Temper (eigene Darstellung nach [1]).....	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Effizienzsteigerung projektbezogen (Beispiel)	27
Tabelle 3-2: Energieaufwand verschiedener Energieträger (vgl. [27])	29
Tabelle 3-3: Spezifische Wärmekapazitäten von Nahrungsmittelbestandteilen [53].....	30
Tabelle 4-1: Verschiedene Definitionen von Motor-Effizienzklassen (vgl. [57]).....	34
Tabelle 4-2: Vergleich zwischen Idealprozess und Realprozess für Kältemaschinen	44
Tabelle 5-1: Verlustfaktoren der Technischen Medien	67
Tabelle 6-1: Das Physikalische Optimum des Schokoladenherstellprozesses	100
Tabelle 6-2: Verlustfaktoren des Schokoladenherstellprozesses	103

Formelzeichen

Zeichen	Erläuterung	Einheit
a	Steigung, Jahr	—
A	Fläche	m ²
c	Kohlenstoffanteil eines Brennstoffes	kg C/kg B
C	Verhältnis der Kapazitätsströme	—
c _p	spezifische Wärmekapazität	J/(kg · K)
e	Aufwandszahl	—
f	mathematische Funktion	—
F _{PE}	Primärenergiefaktor	—
F _{PhO}	PhO-Faktor	—
H	Enthalpie	J
h	spezifische Enthalpie	J/kg
h	Wasserstoffanteil eines Brennstoffes	kg H ₂ /kg B
H _i	Heizwert (inferior)	J/kg
H _s	Brennwert (superior)	J/kg
k	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(K · m ²)
l	Luftmenge	kmol trL/kgB
LF	Elektrische Leitfähigkeit	μS/cm
l _{min}	Mindestluftmenge	kmol trL/kgB
m	Masse	kg
m _{PN}	Nennproduktionsmenge	t _{PN}
N	dimensionslose Übertragungsfähigkeit	—
n	Stickstoffanteil eines Brennstoffes	kg N ₂ /kg B
O ₂ ^a	Sauerstoffkonzentration im Abgas	%
o	Sauerstoffanteil eines Brennstoffes	kg O ₂ /kg B
p	Teilprozess, Druck	—
P	Leistung	J/s
Q	Wärmemenge	J
q _a	spezifischer Abgasverlust	%
q _{Asche}	Verlust durch Unverbranntes in der Asche	%
Q _B	durch Kessel aufgenommene Energie, Brennerbelastung	J
q _{CO}	Verlust durch Unverbranntes im Abgas	%

Q_N	Kesselnutzwärme	J
q_s	spezifischer Wärmeverlust an der Kesseloberfläche	%
s	spezifische Entropie	J/(K · kg)
S	Entropie	J/K
T	Temperatur	K
t	Temperatur	°C
V	Volumen, Verbrauch	m ³
W	Arbeit	J
\dot{W}	Kapazitätsstrom	W/K
w_{auf}	normierter Aufwand	z. B. m ³ /t _{PN}
$w_{\text{auf},0}$	normierter Aufwand bei einer Auslastung von 0 (Bereitschaftsverlust oder auch Basisverbrauch)	z. B. m ³ /t _{PN}
$w_{\text{auf},1}$	normierter Aufwand bei einer Auslastung von 1 (100 %)	z. B. m ³ /t _{PN}
w_{kond}	spezifischer Kondensatwassermassenstrom (bezogen auf den Brennstoffmassenstrom)	kg H ₂ O/kg B
w_{nutz}	normierter Nutzen (Auslastung der Produktion)	t/t _{PN}
w_t	spezifische, technische Arbeit	kWh/m ³ _n
ΔT_{ln}	mittlere logarithmische Temperaturdifferenz	K
K	Kosten	€
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(K · m ²)
ε	dimensionslose Temperaturänderung	—
ε_K	Kälteleistungszahl	—
$\varepsilon_{K,\text{gemessen}}$	gemessene Kälteleistungszahl	—
ε_{KC}	Carnot-Kälteleistungszahl	—
$\bar{\eta}$	Nutzungsgrad	%
η	Wirkungsgrad, allgemein	%
$\bar{\eta}_a$	Jahresnutzungsgrad	%
η_f	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	%
η_k	Kesselwirkungsgrad	%
η_{KC}	Carnot-Gütegrad	%
φ_l	relative Luftfeuchtigkeit der Luft	%
κ	Isentropenexponent	—
λ	Luftzahl	—

μ	Massenanteil	–
ρ	Massendichte	kg/m ³
τ	Zeit	S

Indizes

$\dot{\square}$	zeitliche Ableitung eines Wertes, z. B. Massenstrom \dot{m}
0	Verdampfung (Niederdruckseite des Kältemaschinenprozesses)
a	Abgas oder abgeschlammmt
AZ	aktueller Zeitraum
BM	zusätzliche, neben dem physikalischen Optimalfall nötige Betriebsmittel
BZ	Bezugszeitraum
c	Kondensation (Hochdruckseite des Kältemaschinenprozesses)
C	Carnot
DL	Druckluft
EE	Endenergie
eff	effektiv
el	elektrisch
FU	Frequenzumformer
i	Investition
K	Kältemaschine
kl	Klemme (Motorklemmbrett)
KM	Kältemittel
kond	Kondensat
n	Normzustand, nachgespeist
N	Nennzustand
P	Produkt, Produktionsmenge
PE	Primärenergie
PhO	Physikalisches Optimum
r	Rücklauf
rg	Rauchgas
th	thermisch
TM	Technische Medien
u	Umgebung
v	Vorlauf oder Verbrauch oder Verdunstung
V	Verdichter
vbg	Verbrennungsgas
w	Wasser

1 Einleitung

Die wachsenden klimatischen Probleme, begrenzte Ressourcen und die steigenden Energiekosten sind die Hauptgründe, nachhaltig mit den Ressourcen Energie und Wasser umzugehen.

Die im Verhältnis zu den übrigen Kostenblöcken in der Nahrungsmittelproduktion momentan überproportional steigenden Energiekosten und die klimapolitische Diskussion verleihen dem Thema Energieeffizienz, Energiemanagement und den diesbezüglichen Systematiken und Methoden eine besondere Priorität.

Die Optimierung von Produktionsprozessen im Hinblick auf den Energie- und Stoffverbrauch hat somit eine zentrale Bedeutung.

Sowohl in der Forschung und Entwicklung als auch in der Industrie gewinnt das Thema Energie- und Ressourceneffizienz immer stärker an Bedeutung. So besitzt heutzutage die Frage der Nachhaltigkeit eine ebenso hohe Priorität wie die stabile Energieversorgung für die Produktionsprozesse.

Drumm [16] schreibt in seiner Veröffentlichung *Energy efficiency management for the process industry*: „So deutlich das Ziel Energieeffizienz formuliert ist, so herausfordernd ist der Weg. Die Unterschiedlichkeit der verschiedenen Prozesse, die Verwendung verschiedener Energieträger, das Fehlen von Benchmarks und überhaupt der Definition und Messbarkeit von Energieeffizienz stellen ernst zu nehmende Hürden dar. Zudem sind viele innovative Prozess- und Apparatechniken und Werkzeuge zum energieeffizienten Prozessdesign Gegenstand wissenschaftlicher Forschung, finden aber noch nicht den Weg in die industrielle Anwendung.“

Die zentrale Aufgabe dieser Arbeit ist einerseits die Definition eines ultimativen Referenzprozesses als Optimum. Andererseits sollen Systematiken zur Steigerung der Energie- und Stoffeffizienz im Hinblick auf das Optimum entwickelt bzw. weiterentwickelt werden.

Da diese Arbeit technische Prozesse betrachtet, ergeben sich insbesondere im Bereich der Naturwissenschaften Ansatzpunkte.

Optimierung bedeutet, das Optimum eines Prozesses zu definieren und diesen anschließend auf sein Optimum hin zu gestalten. Umso erstaunlicher ist es, dass das Optimum eines Prozesses in vielen Fällen nicht bekannt ist. Somit müsste vielmehr von „Verbesserung“ gesprochen werden. Denn optimieren kann nur, wer das Optimum kennt.

In dieser Arbeit wird das „Physikalische Optimum“ PhO als Referenzprozess definiert.

Darüber hinaus soll anhand von Systematiken gezeigt werden, wie Prozesse im Hinblick auf das Physikalische Optimum bewertet und gestaltet werden können.

Das Physikalische Optimum soll einerseits für den stationären Zustand eines Prozesses betrachtet werden. Da sich ein Prozess in der späteren Nutzungsphase vielfach größtenteils im instationären, dynamischen Betrieb befindet, soll das Physikalische Optimum andererseits auch unter dynamischen Bedingungen untersucht werden.

In Kapitel 2 wird zunächst der Stand der Wissenschaft dargelegt. Ein Grundlagenkapitel (Kapitel 3) definiert wichtige Aspekte, welche für die weitere Ausarbeitung des Physikalischen Optimums in Kapitel 4, die Entwicklung von Systematiken in Kapitel 5 und die Validierung in Kapitel 6 notwendig sind.

2 Stand der Wissenschaft

Die im Folgenden wiedergegebenen Rechercheergebnisse zeigen den aktuellen Stand der Wissenschaft auf. Die bereits verfügbaren Methoden und Systematiken werden vorgestellt und bewertet. Diese Methoden können sowohl als Basis als auch, mit Blick auf die Weiterentwicklung, als Hilfestellung für die zu entwickelnden Systematiken dienen.

2.1 Leitfaden Energieeffizienz in der Süßwarenindustrie

Der *Leitfaden Energieeffizienz in der Süßwarenindustrie*, herausgegeben vom Arbeitskreis *Maschinen und Anlagen in der Süßwarenindustrie*, ist auf Grundlage des aktuellen Standes der Technik erarbeitet und gibt konkrete Handlungsempfehlungen für die Herstellung von Süßwaren mit Bezug zur Energieeffizienz der diesbezüglichen Produktionsprozesse. So wird beispielsweise darauf aufmerksam gemacht, dass vermeidbare und nicht vermeidbare Verluste differenziert zu betrachten sind. Es werden tabellarisch die üblichen Verfahrensschritte der Süßwarenindustrie nach Energieaufwand und Anwendungshäufigkeit aufgeführt sowie konkrete „Vorschläge zur günstigen Gestaltung“ beschrieben. [2]

Da die Systematiken dieser Arbeit später in einer Schokoladenfabrik validiert werden, könnten diese konkreten Empfehlungen hilfreich sein.

2.2 Ansatz von BINDING

Die Zielsetzung von BINDINGS Dissertation *Grundlagen zur systematischen Reduzierung des Energie- und Materialeinsatzes* [6] ist die Entwicklung einer Methodik zur Reduzierung des Energie- und Materialeinsatzes.

BINDING nennt zwei grundsätzliche Strategien zur Reduzierung des Energie- und Materialeinsatzes für die Herstellung gleicher Ausbringungsmengen [6]:

- Verringerung der Einsatzmenge durch organisatorische Maßnahmen
- Substitution von Produktionsfaktoren (Beispiel: Gas ersetzt Strom)

Für den Betrieb von Fertigungsanlagen spezifiziert er den zusätzlichen Mehraufwand wie folgt:

- „Falsche Betriebsart durch Unkenntnis des Bedienerpersonals
- Schlechter Anlagenzustand durch mangelhafte Wartung
- Nicht anforderungsgerechte Anlagenwahl“ [6]

BINDING bezieht sich auf die „Primärbasis“, lässt alternative Produkte zur Erreichung einer höheren Energieeffizienz zu und betrachtet auch den „Lebenslauf“ des Produktes [6].

Abbildung 2-1 zeigt die Arbeitsinhalte von BINDINGS Methode: Es wird erfasst, analysiert, gelöst und bewertet.

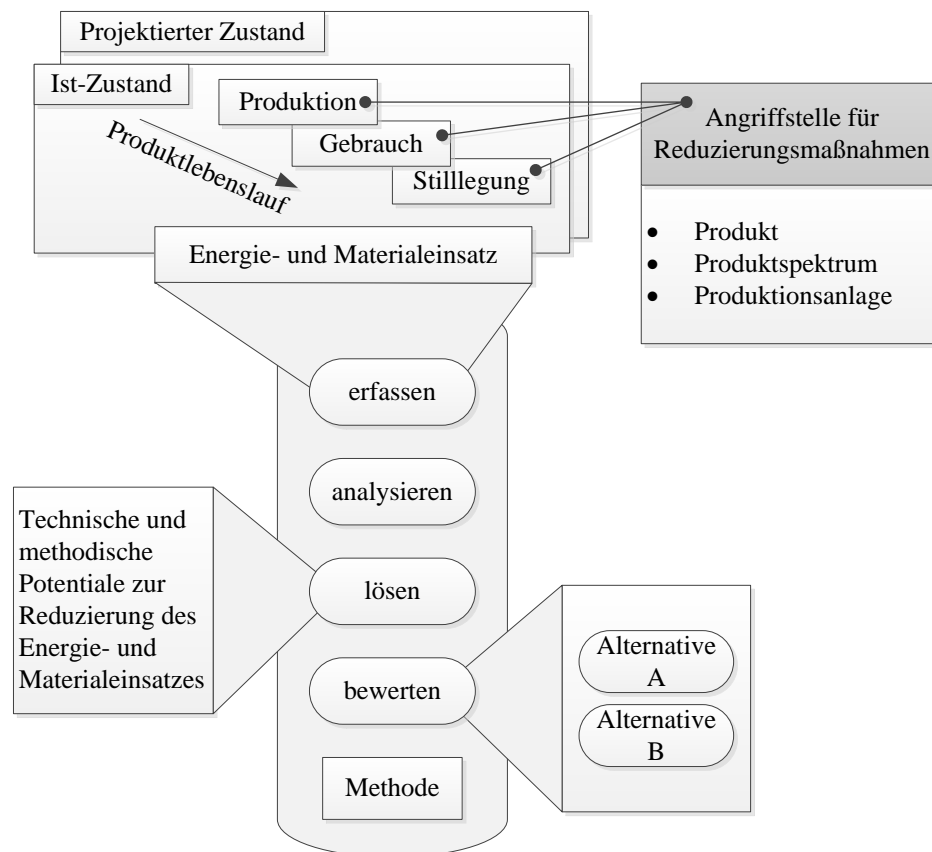


Abbildung 2-1: Arbeitsinhalte von BINDINGS Methode (eigene Darstellung nach [6])

Der erste Schritt ist die Erfassung der Energie- und Materialmengen [6].

Die Beurteilung eines Objektes (in der Analyse-Phase) ähnelt methodisch der Bewertung von Alternativen. Es wird ein Objekt bzgl. bestimmter Beschreibungsgrößen hinterfragt und letztlich mit einem subjektiven Idealzustand verglichen. [6]

BINDING nutzt das Rationalisierungsprinzip, welches fordert, dass ein gegebenes Ziel mit möglichst geringem Einsatz von Mitteln zu erreichen ist. Eine wissenschaftlich begründete Methode zur Niveaubestimmung des Untersuchungsobjektes ist für BINDING der Vergleich. Je nach Vergleichsfeld differenziert er zwischen Betriebs-, Branchen- und Weltstandsvergleich bzw. inner- und zwischenbetrieblichem Vergleich. [6]

Als Vergleichsmaß nennt BINDING den subjektiv existierenden Idealzustand und das potentielle Best-Niveau [6].

Die Art und Betriebsweise einer Anlage sind für BINDING wesentliche Einflussgrößen, was den Energie- und Materialeinsatz angeht. [6]

Die Lösungsfindung setzt sich nach BINDING aus einer Analyse- und einer Synthesephase zusammen. Die Analyse bedeutet Informationsgewinn durch Zerlegen, Gliedern und Untersuchen von Eigenschaften einzelner Elemente und ihrer Abhängigkeiten. Die Synthese umfasst die Informationsverarbeitung durch Bilden von Verbindungen, Verknüpfen von Elementen, woraus neue Wirkungen resultieren, und die Darstellung einer neuen Ordnung. [6]

Abbildung 2-2 zeigt die Systematik der Reduzierungspotentiale und Reduzierungsstrategien nach BINDING.

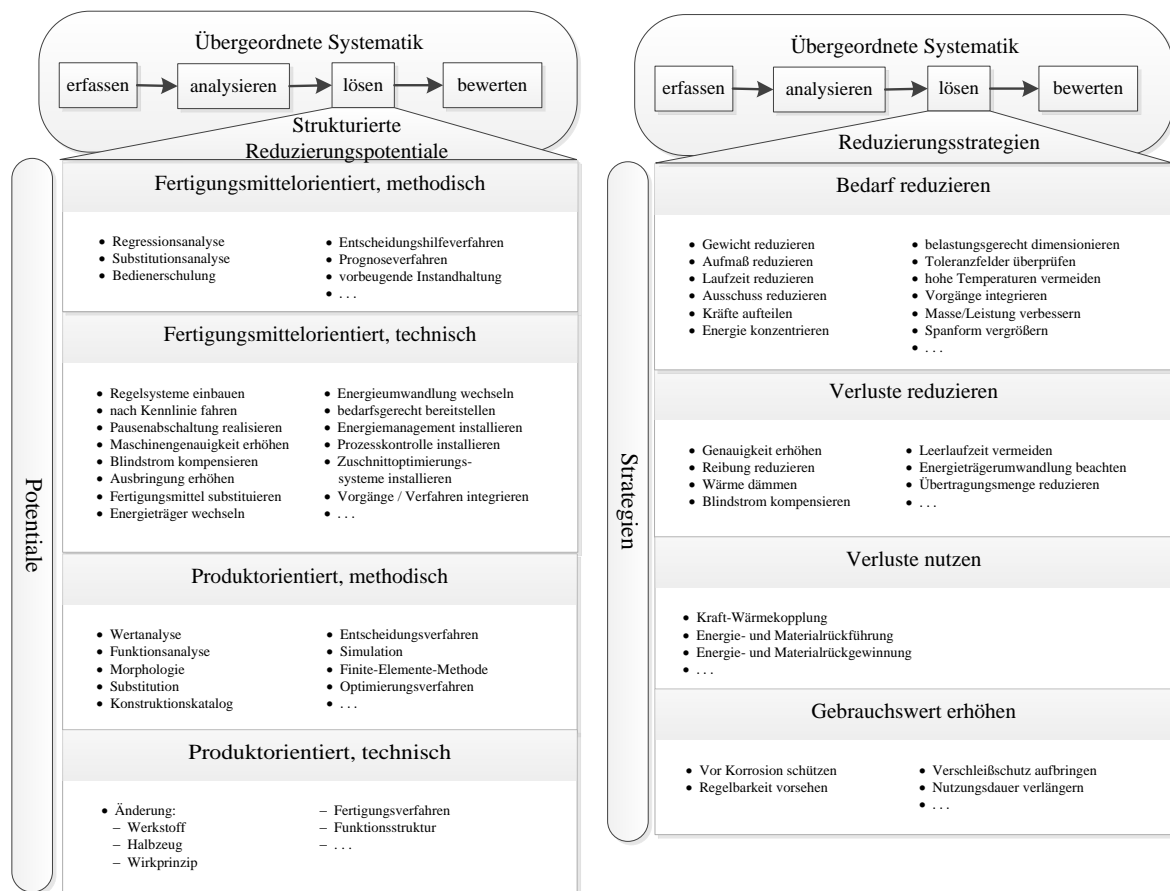


Abbildung 2-2: Potentiale und Strategien bei BINDING (eigene Darstellung nach [6])

In der Bewertungsphase soll aus der Vielzahl der Lösungsalternativen die günstigste¹ ausgewählt werden. Es sollen nur Lösungen ausgearbeitet werden, die das Anforderungsprofil erfüllen und eine Realisierung mit erkennbar zulässigem Aufwand erwarten lassen. [6]

Die Darstellung des Energieeinsatzes und des spezifischen Energieeinsatzes in Abhängigkeit der Produktionsleistung in Abbildung 2-3 demonstriert das dynamische Verhalten (Verbrauch) einer Produktionsanlage. Wird der Energieeinsatz durch die Produktionsmenge geteilt, erkennt man die Hyperbelfunktion (rechter Teil der Darstellung). Der produktspezifische Energieverbrauch geht für Produktionsleistungen von null gegen unendlich.

¹ In der weiteren Ausführung des Bewertungsverfahrens geht BINDING darauf ein, ob der Nutzen monetär oder nicht monetär bewertbar ist.

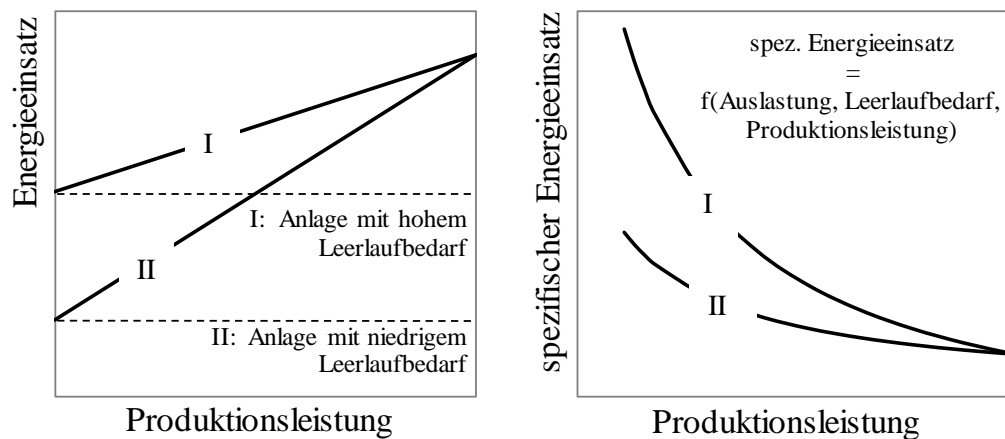


Abbildung 2-3: Energieeinsatz bei BINDING (eigene Darstellung nach [6])

Für die eigene Arbeit können folgende Handlungsansätze/Reduzierungspotentiale BINDINGS genutzt werden:

1. „Verfahren und Technologien mit weniger energetischen Prozessstufen
2. Geänderte Wirkprinzipien für energetisch uneffektive Verfahren
3. Beachtung des „vergegenständlichten“ Energieverbrauchs bei der Verfahrenswahl
4. Beeinflussung des energetischen Betriebsverbrauchs von Produkten
5. Richtige Energieträgerwahl im Rahmen gegebener Substitutionsmöglichkeiten
6. Erhöhung der Energiedichte in Verbindung mit gezielter örtlicher Energieübertragung
7. Zweckmäßige Kapazitätsbemessung bei optimaler Auslastung von Produktionsanlagen
8. Minimierung des Anfalls von Abwärme
9. Nutzung nicht vermeidbarer Abwärme
10. Verfahrenskopplung“ [6]

Ein Beispiel aus der Nahrungsmittelindustrie für Punkt 6 ist die Kühlung der Verpackungsmaschinen. Es wird oftmals die gesamte Verpackungszone gekühlt anstatt ausschließlich die Verpackungsmaschine an sich.

Als Beispiel für Punkt 7 aus der Nahrungsmittelindustrie wird ein Kühltunnel angeführt, welcher infolge steigender Taktzahlen wesentlich kälter gefahren wird, weil die ursprünglich konstruierte Verweilzeit des zu kühlenden Produktes nicht mehr eingehalten wird.

2.3 Ansatz von DRUMM

Bayer Material Science hat als EnMS (Energiemanagementsystem) – auch im Hinblick auf die Normen DIN EN 16001 und ISO 50001 – “STRUCTese®“ entwickelt, welches dazu dienen soll, die produktspezifischen CO₂-Emissionen im Zeitraum von 2005 bis 2020 um 25 % zu verringern. Die Veröffentlichung *Energy efficiency management for the process industry* von DRUMM zeigt den theoretischen Hintergrund auf und stellt die Methode vor [15]².

STRUCTese® ist stark auf die Bedürfnisse der chemischen Großchemie zugeschnitten und soll in einem Folgeprojekt – gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) – zu einem universell einsetzbaren Managementwerkzeug und Standard für die Energieeffizienz weiterentwickelt werden [16].

Der folgende Text enthält mehrere Abkürzungen, welche zu Beginn der Übersichtlichkeit halber kurz erläutert werden:

- BDP: Best Demonstrated Practice (bestmögliche Praxis)
- CEC: Current Energy Consumption (aktueller Energieverbrauch)
- EE Check: Energy Efficiency Check (Energie-Effizienz-Check)
- ISBL: inside battery limit
- MTC: maximum theoretical capacity (maximale theoretische Kapazität)
- OSBL: outside battery limit
- OEO: Operational Energy Optimum (operatives-Energie-Optimum)
- PEO: Plant Energy Optimum (Werk-Energie-Optimum)
- STRUCTese®: Structured Efficiency System for Energy
- TEO: Theoretical Energy Optimum (Theoretisches-Energie-Optimum)

Die erste Phase von STRUCTese® ist in 2 Abschnitte aufgeteilt [15]:

1. Energie-Effizienz-Check (EE-Check)
 - a) Analyse
 - b) Ideen Generation
 - c) Evaluation
2. Energie Effizienz Management
 - a) Implementierung
 - b) Nachhaltigkeit

² STRUCTese® bezieht sich auf den Primärenergieverbrauch, um die verschiedenen Energien vergleichbar zu machen. Wenn Sekundärenergien in Primärenergie zurückgerechnet werden, wird der Umrechnungsfaktor des weltweit bestmöglichen Prozesses und nicht der lokal ermittelte Faktor benutzt. DRUMM stellt als Beispiel den durchschnittlichen Faktor von 40 % für elektrische Energieerzeugereffizienz dem Faktor von 60 % gegenüber, der dem besten Prozess entspricht [15].

Das Ergebnis des EE-Checks wird in Abbildung 2-4 nach technischer Machbarkeit (Abszisse) und Profitabilität (Ordinate) der Energieeffizienzmaßnahmen differenziert. Die Blasengröße beschreibt das Einsparpotential der Maßnahme.

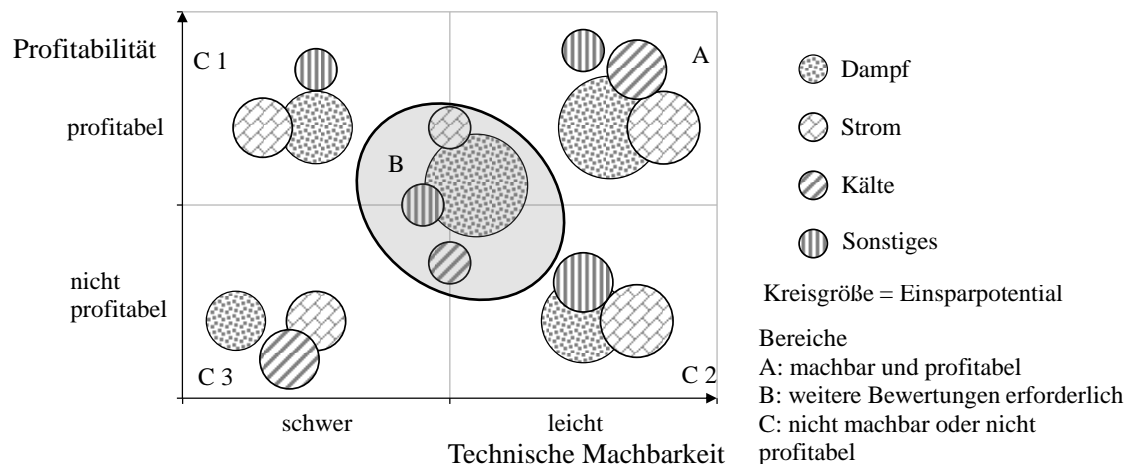


Abbildung 2-4: Typisches Energieeinsparungs-Portfolio (eigene Darstellung nach [15])

Die zweite Phase stellt die „Energieverlustkaskade“ nach Abbildung 2-5 dar, welche dem Werkleiter als transparentes Entscheidungsinstrument dienen soll und den Fortschritt der Energiereduktion zeigt. Die Verlustkaskade sollte mindestens 80% des totalen Energieverbrauches aufzeigen. Praktischerweise werden Energien mit ungerechtfertigt hohem Erfassungsaufwand vernachlässigt. [15]

Ausgehend vom aktuellen spezifischen Energieverbrauch (CEC^3) der bestehenden Fabrik werden anschließend die Verluste gezeigt [15].

Die Differenz zwischen CEC und OEO zeigt den dynamischen Verlust, welcher abhängig ist von Produkttyp, qualitativen Anforderungen, Produktionsauslastung, operationalen Umständen und „Energiebewusstheit/-achtsamkeit“, und liefert als Ergebnis das operative-Energie-Optimum (OEO), welches unter maximaler theoretischer Kapazität (MTC) statisch erreicht wird. [15]

Die Differenz zwischen OEO und PEO zeigt den statischen Verlust und damit das suboptimale Equipment (Produktionsprozesse und Technische Medien) innerhalb der Fabrik und wird aus dem „EE-Check“ ermittelt, wobei die Profitabilität eine Rolle spielt (siehe Abbildung 2-4). Um diese Differenz bzw. diesen Verlust zu reduzieren, sind Investitionen erforderlich. [15]

Das „theoretische-Energie-Optimum“ (TEO) charakterisiert den geringsten Energieverbrauch, basierend auf einem real möglichen Referenzprozess, welcher auch die externen statischen Verluste (Versorgungsverluste) einbezieht. [15]

³ Der CEC beschreibt sämtliche Energien, welche die Werkgrenze passieren inklusiver derer, die im Rahmen von Energielieferverträgen weiter an dritte Abnehmer gelangen.

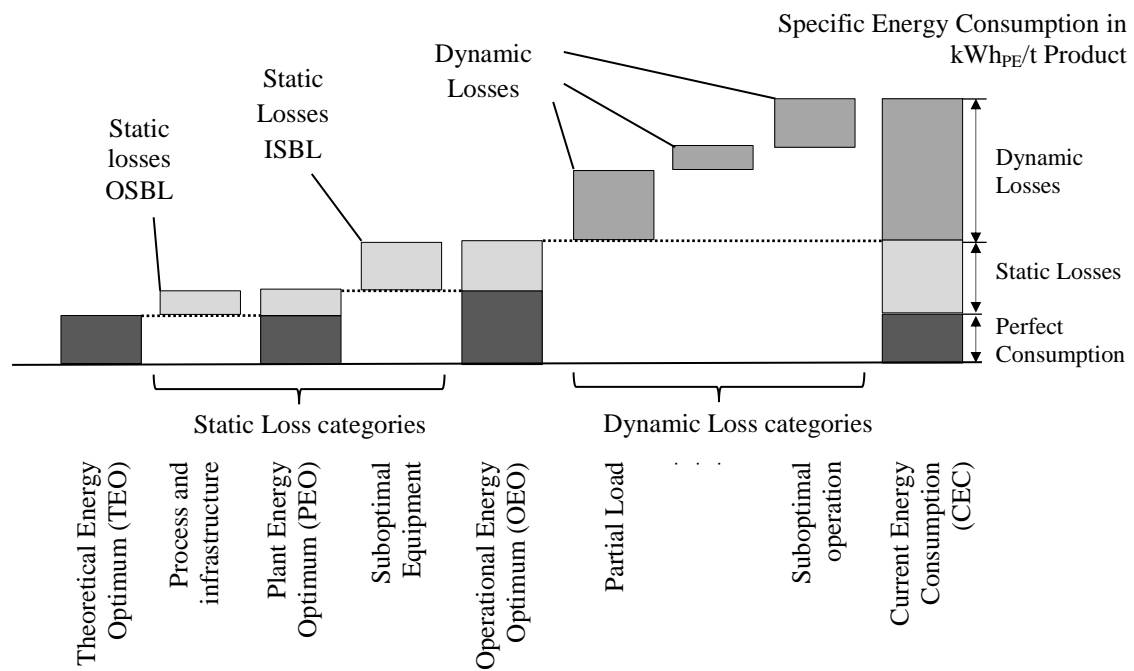


Abbildung 2-5: STRUCTese®-Energieverlustkaskade (eigene Darstellung nach [15])

Abbildung 2-6 veranschaulicht den dynamischen Verlust mittels der Regressionsfunktion „BDP“. Die Differenz der Funktion „BDP“ und „MTC“ zeigt den Teillastverlust in Abhängigkeit von der Auslastung der Anlage. Messwerte oberhalb der Funktion „BDP“ sollen Verluste durch suboptimale operationale Umstände darstellen [15].

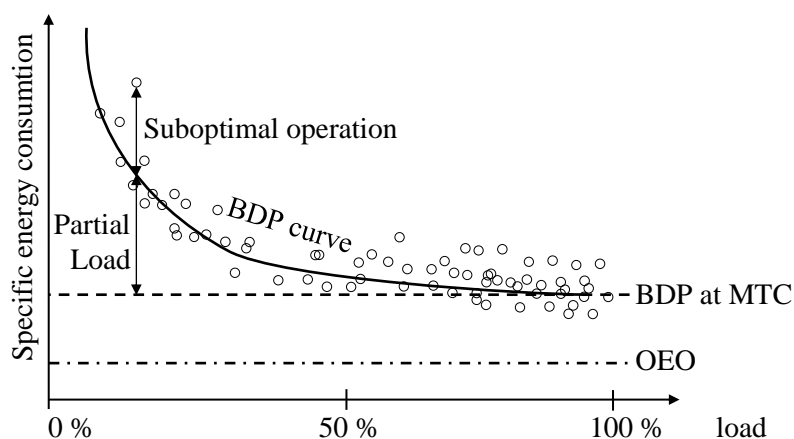


Abbildung 2-6: Spezifischer Verbrauch über der Auslastung (eigene Darstellung nach [15])

STRUCTese® beinhaltet mehrere Ansätze, die für die hier anzufertigende Arbeit nützlich sind. Es erscheint insbesondere als sinnvoll, Bestandsprozesse mit einem Referenzprozess (in STRUCTese® „Theoretisches-Energie-Optimum“ (TEO) genannt) zu bewerten. Ebenso erscheint das Zerlegen von Verbräuchen in einen statischen und dynamischen Anteil sinnvoll. Die Methode kann insofern erweitert werden, als dass sie auch für Stoffe wie Wasser und Abfall verwendet werden könnte und in einem weiteren Schritt das physikalische Optimum aufgezeigt wird. Ebenso könnte das – wenn auch ungenutzte – Potential von denkbaren Kopplungsprozessen benannt werden.

2.4 Ansatz von ENGELMANN

ENGELMANN entwickelt in seiner Dissertation *Methoden und Werkzeuge zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Fabriken* eine Methode zur Integration von Energieeffizienzfaktoren in den Planungsprozess. Sein Betrachtungsbereich ist die Fahrzeugproduktion [19].

ENGELMANN nennt die Einsparpotentialarten „Marktpotential“, „wirtschaftliches Potential“, „technisches Potential“ und „theoretisches Potential“. Für das theoretisch mögliche Potential spielen die Gesetze der Thermodynamik eine wichtige Rolle. ENGELMANN folgt der Auffassung, dass ein Energiebedarf, der nicht der Leistungserstellung dient, Verschwendung ist und führt daher explizit den Leerlaufbedarf ein. [19]

Abbildung 2-7 zeigt ENGELMANNNS Umfrageergebnisse in Bezug auf die Planungspriorität. Der Medienverbrauch (Wasser und Druckluft), der Energieverbrauch (Strom und Gas) sowie die Emissionen weisen – nach der Meinung der Planer – eine geringere Planungspriorität auf, als die übrigen Kriterien. [19]

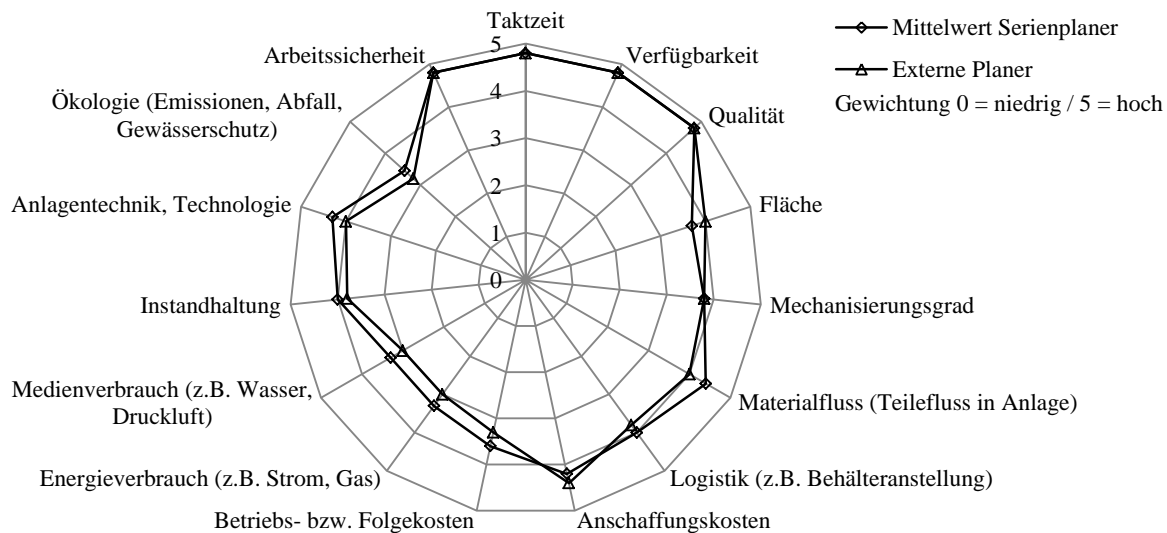


Abbildung 2-7: Umfrageergebnisse zu Planungsprioritäten (eigene Darstellung nach [19])

Die Auswertung ist deshalb interessant, weil ENGELMANNNS Arbeit (aus dem Jahre 2009) noch recht aktuell ist.

Insbesondere wegen der in den letzten Jahren angestiegenen Energiepreise darf angenommen werden, dass die Prioritäten Medienverbrauch, Energieverbrauch sowie die Emissionen steigen. Infolge steigender Priorität ist die Notwendigkeit von Systematiken für diesen Bereich umso größer.

In Abbildung 2-8 zeigt ENGELMANN allgemeingültige Handlungsansätze („Wirkungsgrad“, „Reduzierung Verluste“, „Rückgewinnung“, „Substitution“, „Dimensionierung“ und „Fahrweise“) für eine rationelle Energieverwendung, welche er für seine Methode nutzt. Als Eingangsgrößen betrachtet ENGELMANN den Energieeinsatz E_{Einsatz} sowie Werkstoffe. Als Ausgangsgrößen betrachtet ENGELMANN Produkte sowie einen Teil der Energie, der im Sinne des Prozesses nicht genutzt werden kann E_{Verlust} und einen Teil der Energie E_{Anfall} , welcher teilweise nutzbar ist. [19]

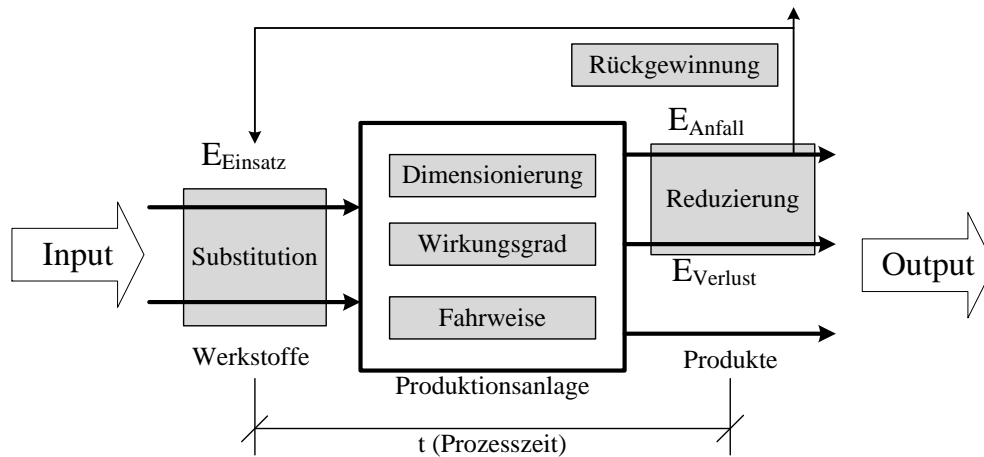


Abbildung 2-8: Handlungsansätze und Fertigungssystem (eigene Darstellung nach [19])

Abbildung 2-9 zeigt die fünf Schritte von ENGELMANN'S Methode, welche er wie folgt erläutert:

„Im Schritt Systembestimmung wird der Betrachtungsbereich definiert, sowie der spezifische Energiebedarf bestimmt. Der Schritt Konzept/Synthese beinhaltet die Erstellung eines Anlagenkonzeptes bzw. unterschiedliche Varianten unter Beachtung der geschilderten Handlungsansätze. Der Schritt Auswahl enthält die Entscheidung einer Variante unter Berücksichtigung der Lebenszykluskosten. In der Realisierung werden die vom Planer und Lieferanten getroffenen Annahmen auf das tatsächliche Eintreten bewertet. Die Nutzungsphase beinhaltet ein Monitoring zur Generierung eines energetischen Wissens zu Fertigungsanlagen.“ [19]

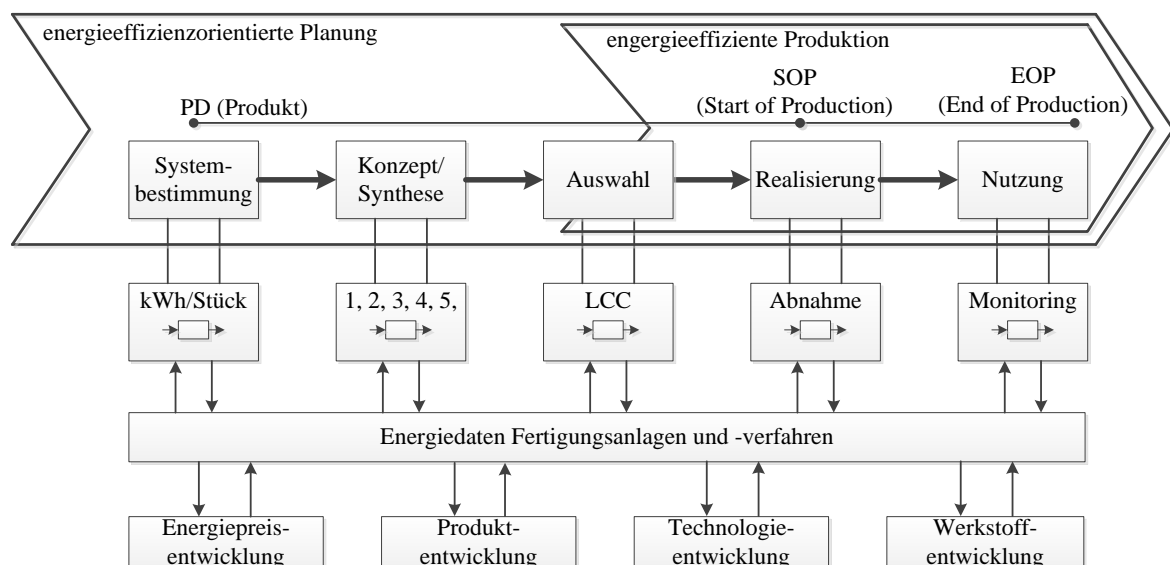


Abbildung 2-9: ENGELMANN'S Methode (eigene Darstellung nach [19])

Zur Integration sich ändernder Rahmenbedingungen hat ENGELMANN Regelkreise installiert. Abbildung 2-10 zeigt den Regelkreis zur Datengenerierung und Anpassung, mit welchem ENGELMANN sicherstellen will, dass sich das Planungssystem den wechselnden internen und externen Anforderungen anpasst. [19]

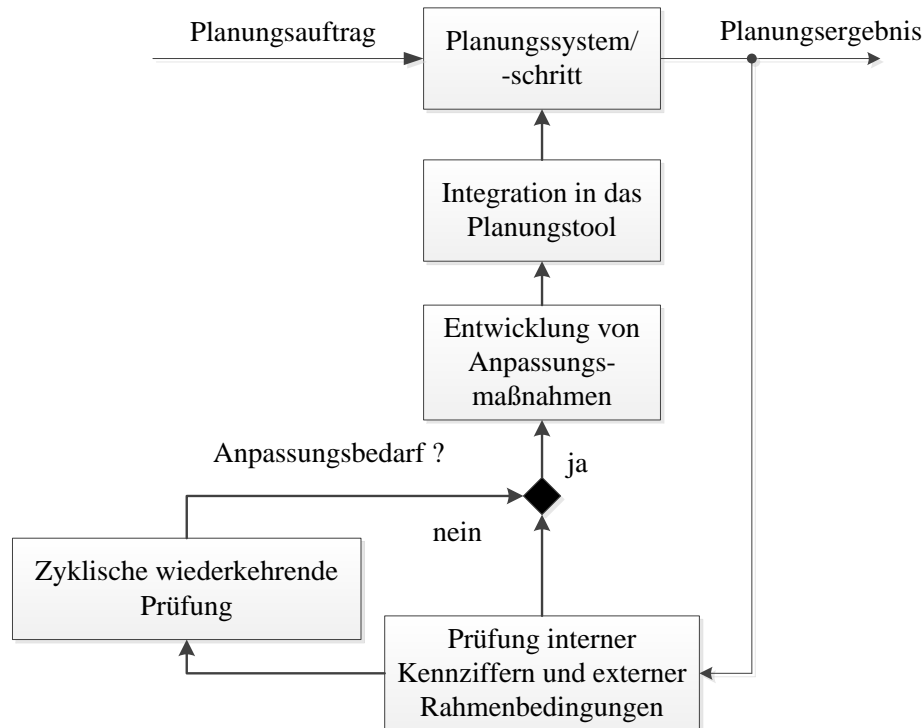


Abbildung 2-10: Regelkreis zur Datengenerierung (eigene Darstellung nach [19])

Die Anwendung ENGELMANNS Methode stellt sicher, dass bereits im Planungsprozess der Energieeffizienzgedanke (im Hinblick auf minimale Lebenszykluskosten (LCC)) in die Projektierung einbezogen wird.

Die Ergebnisse der eigenen Arbeit könnten in einem weiteren Schritt in ENGELMANNS Methode implementiert werden. Der Gedanke, bereits im Planungsprozess eine Anlage in Bezug auf das Physikalische Optimum zu bewerten und dies mittels einer Systematik zu unterstützen, wäre sicherlich auch im Automobilbau zweckmäßig.

Weiter könnten die in ENGELMANNS Arbeit beschriebenen Handlungsansätze nach Abbildung 2-8 auch für die anzufertigenden Systematiken dieser Arbeit genutzt werden. ENGELMANNS Methode könnte über die Planung hinaus für die Instandhaltung mit dem Fokus auf Energieeffizienz genutzt werden. Ein Beispiel dafür sind Hocheffizienzpumpen, welche bei Defekten ineffizienterer Pumpen in bestehende Prozesse implementiert werden.

2.5 Ansatz von FRESNER

FRESNER beschreibt in seiner Buchveröffentlichung *Ressourceneffizienz in der Produktion: Kosten senken durch Cleaner Production* [23] seine Methode „Cleaner Production“ wie folgt:

„Cleaner Production zielt darauf ab, industrielle Produktionssysteme ressourceneffizient, möglichst unter Nutzung von erneuerbaren Ressourcen und unter Vermeidung von Risiken, die von Stoffen und deren Freisetzung ausgehen, zu gestalten. Cleaner Production stellt konsequent die Frage nach der Herkunft und dem Grund für den Anfall von Abfällen und Emissionen mit dem Ziel, aus dieser konsequenten Ursachenforschung Ansätze für deren Vermeidung zu entwickeln. Cleaner Production wirkt auf technischer und organisatorischer Ebene im Unternehmen. Einerseits soll eine effiziente Nutzung von stofflichen und energetischen Ressourcen durch angepasste Technologien erreicht werden, andererseits soll eine lernende Organisation gestaltet werden, die – ähnlich einem einfachen Umweltmanagementsystem – aus einer Politik, einem Team, einer Analyse und einem Feedback-Prozess besteht, um den Betrieb schrittweise hin zu einem möglichst ressourceneffizienten Betrieb zu entwickeln. [...] Ziel ist eine optimierte Nutzung aller Ressourcen, um jeglichen Output des Betriebes, der nicht Produkt ist, zu minimieren, dadurch Kosten für Rohstoffe und Energie zu sparen und mögliche Probleme, die aus Umweltauswirkungen oder Arbeitssicherheitsrisiken entstehen, zu vermeiden.“ [23]

Abbildung 2-11 zeigt Strategien, die im Rahmen von „Cleaner Production“ zum Tragen kommen.

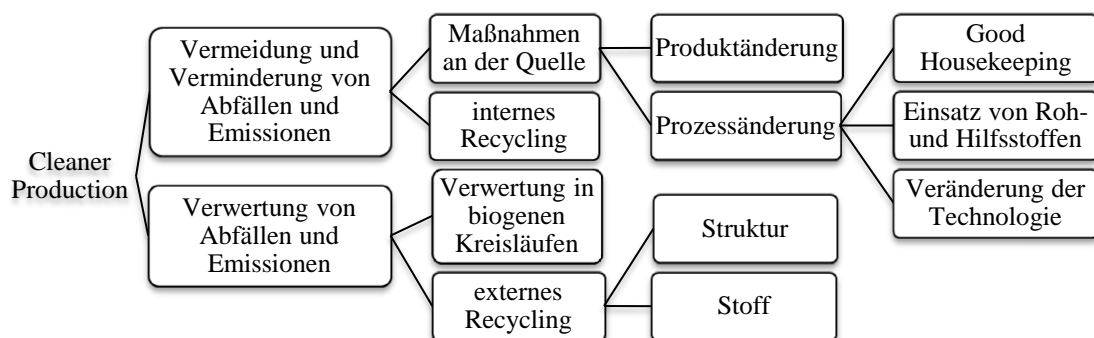


Abbildung 2-11: Strategien von Cleaner Produktion (eigene Darstellung nach [23])

Im Kapitel „Vermeidungsoptionen finden“ widmet sich FRESNER dem eigentlichen Herzstück des Cleaner-Production-Projektes. Inhalt ist die Entwicklung von Optionen zur vorsorgenden Vermeidung von Abfällen und Emissionen sowie die Reduktion des Wassereinsatzes. [23]

Unter den Lösungsprinzipien zur Unterstützung des Brainstormings nennt FRESNER einige Methoden, welche auf abstrakter Ebene Lösungswege aufzeigen sollen [23]:

- Die Abfallschachtel
- Den Betrieb zusperren
- Warum, warum, warum
- Lernen aus Widersprüchen
- Kennzahlen und Benchmarking
- Super, super ideal
- Minus 5 %⁴
- Weglassen⁵
- Das Sauberste zum Schluss⁶
- Trennen
- Irgendwie/wo anders wiederverwerten⁷

FRESNERS Gedanke der optimierten Nutzung aller Ressourcen, um jeglichen Output des Betriebes, welcher nicht Produkt ist, zu minimieren, ist ebenfalls ein Fokus dieser Arbeit.

Insbesondere der Ansatz „*Super, super ideal*“, den FRESNER im Rahmen des Brainstormings nennt, ist eine Grundlage, welche in dieser Arbeit weiter behandelt werden wird:

„Bei diesem Ansatz vergleicht man die tatsächlich beobachtete Situation mit den zuvor festgelegten Idealen, indem die folgenden Fragen gestellt werden:

- Wieviel Material-Input, wieviel Energie-Input und wieviel Frischwasser-Input würden für den analysierten Prozess benötigt, wenn man das gewünschte Produkt mit einem idealen Produktionsprozess herstellen könnte?
- Was wäre der minimale Rohstoffverbrauch (aus physikalischem, mechanischem oder chemischem Blickwinkel) für Wasser und/oder Energie, wenn der Prozess eine 100%-ige Effizienz aufweisen würde, d.h. wenn keine praktischen, zeitlichen und örtlichen Beschränkungen vorhanden wären?

Diese Werte bilden dann den Ausgangspunkt für die Analyse der Frage, was den Betrieb heute davon abhält, so effizient wie der Idealprozess zu sein, und welche Abhilfe man für Hindernisse, 100 % effizient zu sein, finden könnte.“ [23].

⁴ Der Ansatz „*Minus 5 %*“ sieht ein experimentelles Vorgehen vor. Es wird versucht, mit geringerem Einsatz (zum Beispiel einer geringeren Menge an Reinigungsmittel) das gleiche Ergebnis zu produzieren. Ist dies möglich, wird der Ansatz wiederholt. Wenn schließlich das gewünschte Ergebnis nicht mehr erreicht wird, wird der letzte Schritt zurückgenommen [23].

⁵ Das Prinzip „*Weglassen*“ bedeutet, zu hinterfragen, ob es im fraglichen Prozess Elemente gibt, die vielleicht vollständig weglassen werden könnten [23].

⁶ „*Das Sauberste zum Schluss*“ bedeutet, Arbeitsmedien den tatsächlichen Prozessanforderungen entsprechend auszuwählen. Beim Reinigen einer Lebensmittelproduktionsanlage könnte beispielsweise zum Vorreinigen das bei vorangegangenen Reinigungen aufgefangene Spülwasser eingesetzt werden. Erst im letzten Reinigungsschritt würde dann tatsächlich Frischwasser eingesetzt werden. [23]

⁷ Der Ansatz „*Irgendwie/wo anders wiederverwerten*“ bedeutet zu hinterfragen, wo „Abfälle“ und „Emissionen“ intern wiedereingesetzt werden könnten [23].

Die Methode „*Warum, warum, warum*“ bildet den Ansatz, nicht die erste Antwort zu akzeptieren, sondern weiter zu fragen, um die ablaufbedingte Ursache für ein Problem zu finden [23].

Zur übersichtlichen Darstellung und Analyse der Gründe wird häufig das Fischgrätendiagramm nach Abbildung 2-12 verwendet.

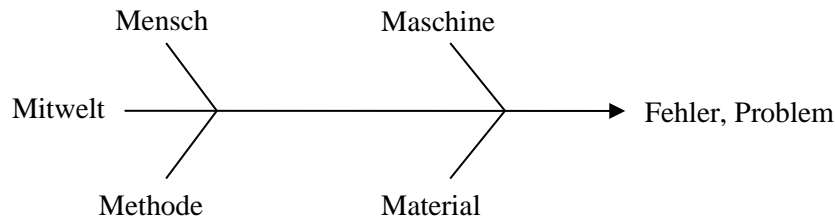


Abbildung 2-12: Fischgrätendiagramm (eigene Darstellung nach [23])

Die Methoden „*Warum, warum, warum*“, „*Minus 5%*“ und „*Weglassen*“, stellen nach eigener Überzeugung gute Methoden dar, um ein Problem ursächlich zu analysieren.

Die Methoden „*Das Sauberste zum Schluss*“ und „*Irgendwie/wo anders wiederverwerten*“ könnten als brauchbare Ansätze für eine Verwendung im Rahmen von Kopplungsprozessen und Prozesskaskaden dienen.

2.6 Ansatz von PÜSCHEL

PÜSCHEL behandelt in seiner Dissertation *Energieeffizienz-Steigerungspotentiale in großen Anlagebeständen* [43] die verschiedenen Aspekte, Methoden und Grenzen der Identifikation und Bewertung des Energieeffizienzsteigerungspotentials in großen Anlagenbeständen von Bündelkunden⁸ unter Verwendung mathematisch-statistischer Methoden.

Ein Schwerpunkt von PÜSCHELs Arbeit ist die detaillierte Untersuchung von Lastgängen bei einer Vielzahl von Betriebsstätten. Dabei galt es vor allem, verbrauchsaffällige Betriebsstätten zu identifizieren. Hierzu wurden spezielle clusteranalytische Identifikationsmethoden entwickelt und rechnerisch in Betrieb genommen. Das entwickelte Identifikationsverfahren soll deutlich auffällige Verbraucher (Ausreißer) zuverlässig erkennen. Die Identifikation soll in ein vollautomatisches Überwachungswerkzeug implementiert werden können. [43]

Betriebe haben unterschiedliche Lastgänge mit bestimmten Mustern, welche sich durch das Verbrauchsverhalten von Mensch und Maschine erklären lassen. Die Methoden beruhen allein auf statistischen Auswertungen und den daraus gewonnenen Erkenntnissen, die zu Veränderungen in Verhaltensweisen oder Anpassungen an Gerätesteuern⁹ führen sollten. [43]

PÜSCHEL validiert seine Methoden an einem anonymisierten großen europäischen Bündelkunden aus dem Sektor des Lebensmitteleinzelhandels (1272 Einzelmärkte). [43]

PÜSCHELs Methodik könnte über die hier anzufertigende Dissertation hinaus interessant sein, wenn die in dieser Arbeit entwickelten Systematiken auf mehrere Werke/Prozesse angewendet werden, welche eine Vielzahl von Einzelverbrauchern aufweisen. Zur Anwendung von PÜSCHELs Methode müssten die Lastgänge jedoch insofern vergleichbar sein, als die Prozesse identisch oder zumindest sehr ähnlich sein sollten. Ohne diese Vergleichbarkeit ließe sich nach PÜSCHELs Methode kein „Standard“ [43] definieren und somit könnten mit diesem Standard auch keine auffälligen Verbraucher verglichen werden.

Denkbar wäre die Anwendung seiner Methode in der Nahrungsmittelproduktion auch für die technischen Medien, für die produktübergreifend ähnliche bzw. gleiche Randbedingungen gelten, wie

- Druckluftversorgung (Ventilantriebe, Wegblasen von Ausschuss etc.),
- Kälteversorgung (Kühlung der Verpackungshallen, Klimatisieren von Büros etc.) und
- Wärmeversorgung (Hallenkonditionierung, Büros etc.).

Weiterhin könnte PÜSCHELs Methode auch für die vollautomatische Überwachung einer einzelnen Betriebsstätte im Vergleich zu sich selbst funktionieren. Insbesondere wenn ein Betrieb optimiert wurde, könnte auf diese Weise die Nachhaltigkeit der umgesetzten Maßnahmen nachgewiesen werden (Beispiel: Druckluftleckage-Rate, Filterabklopfung während Nichtproduktionszeiten).

⁸ Als Bündelkunden werden in der Energiewirtschaft Stromabnehmer zusammengefasst, die mehrere einzelne Standorte besitzen und – unabhängig von der jeweiligen Größe – sich nur noch von einem Energieversorger beliefern lassen. Beispiele dafür sind Kettenkunden oder Filialisten oder auch Betriebe mit mehreren Produktionsstandorten [43].

⁹ Technisch (Prozess) bedingte Verbräuche werden dabei nicht erkannt (Beispiel: alte, ineffiziente Kälteanlage) [43].

2.7 Energiemanagementsysteme

2.7.1 Ziel der Norm DIN EN ISO 50001

„Diese Internationale Norm legt die Anforderungen zur Einführung, Verwirklichung, Aufrechterhaltung und Verbesserung eines Energiemanagementsystems fest, mit dem Ziel, eine Organisation in die Lage zu versetzen, durch einen systematischen Ansatz eine kontinuierliche Verbesserung der energiebezogenen Leistung, einschließlich der Energieeffizienz, des Energieeinsatzes und des Energieverbrauchs, zu erzielen. Diese internationale Norm legt Anforderungen bezüglich des Energieeinsatzes und des Energieverbrauchs fest, einschließlich Messung, Dokumentation und Berichtswesen, Auslegungs- und Beschaffungspraxis für Einrichtungen, Systeme, Prozesse und Personal, die zur energetischen Leistung beisteuern.“ [12]

2.7.2 Politischer Hintergrund

Ein Energiemanagement ist eine Voraussetzung für die Befreiung von stromintensiven Unternehmen von der EEG-Umlage. Für Unternehmen mit einem Stromverbrauch von über 10 Gigawattstunden pro Jahr und Stromkosten in Höhe von mehr als 14% der Bruttowertschöpfung ist dabei zum Beispiel eine Zertifizierung nach DIN EN ISO 50001 notwendig. [8]

Die Norm ist ebenfalls die Grundlage für den Spitzensteuerausgleich bei Energie- und Stromsteuer für große Unternehmen. Große Unternehmen sind in diesem Kontext solche mit einem Jahresumsatz von über 50 Mio. Euro. Bei Unternehmen mit einem Jahresumsatz von weniger als 50 Mio. Euro (kleine und mittlere Unternehmen (KMU)) genügt ein alternatives System zur Verbesserung der Energieeffizienz, welches den Anforderungen der DIN 16247-1 (Energie-Audit-Norm) entspricht. [40]

2.7.3 Prozesse im Managementsystem und Schnittstellen

Abbildung 2-13 zeigt die Prozesse im Managementsystem und die Schnittstellen zu den in der Praxis meist vorher eingeführten Managementsystemen nach DIN EN ISO 14001 (Umweltmanagementsysteme) und DIN EN ISO 9001 (Qualitätsmanagementsysteme).

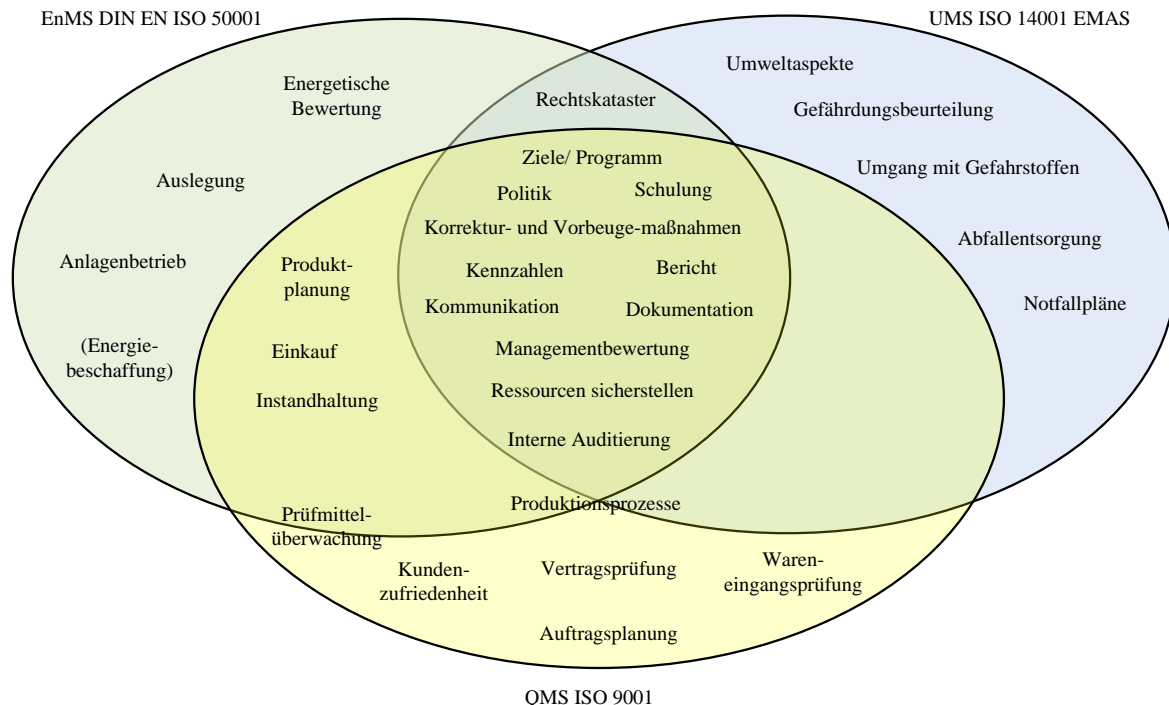


Abbildung 2-13: Prozesse im Managementsystem (eigene Darstellung nach [7])

Die DIN EN ISO 50001 basiert auf dem als PDCA-Zyklus (Plan-Do-Check-Act) bekannten kontinuierlichen Verbesserungsprozess und integriert das Energiemanagement in das Tagesgeschäft der Organisation, wie in Abbildung 2-14 dargestellt [12]. Der PDCA-Ansatz wird in der Norm wie folgt beschrieben:

- „Plan (Planung): Durchführung einer energetischen Bewertung und Festlegung der energetischen Ausgangsbasis, der Energieleistungskennzahlen (en: energy performance indicators, (EnPIs¹⁰), der strategischen und operativen Energieziele und der Aktionspläne, die erforderlich sind zur Erzielung der Ergebnisse zur Verbesserung der energiebezogenen Leistung in Übereinstimmung mit den Regeln der Organisation;
- Do (Einführung/Umsetzung): Einführung der Aktionspläne des Energiemanagements;
- Check (Überprüfung): Überwachung und Messung der Prozesse und wesentlichen Merkmale der Tätigkeiten, die die energiebezogene Leistung bestimmen, mit Blick auf Energiepolitik und strategische Ziele sowie Dokumentation der Ergebnisse;
- Act (Verbesserung): Ergreifung von Maßnahmen zur kontinuierlichen Verbesserung der energiebezogenen Leistung und des EnMS.“ [12]

¹⁰ Energieleistungskennzahlen:

„EnPIs können einfache Parameter, einfache Verhältniszahlen oder komplexe Modelle sein. EnPIs können beispielsweise den Energieverbrauch je Zeit, Energieverbrauch je Produktionseinheit und multivariable Modelle umfassen.“ [12]

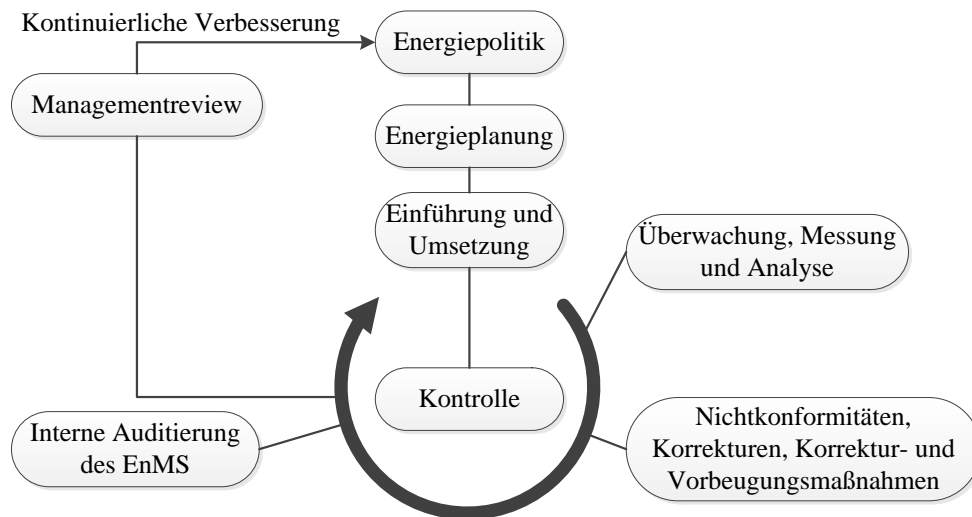


Abbildung 2-14: Modell eines Energiemanagementsystems (eigene Darstellung nach [12])

Abbildung 2-15 zeigt, wie durch ein EnMS Kosten gesenkt werden sollen.

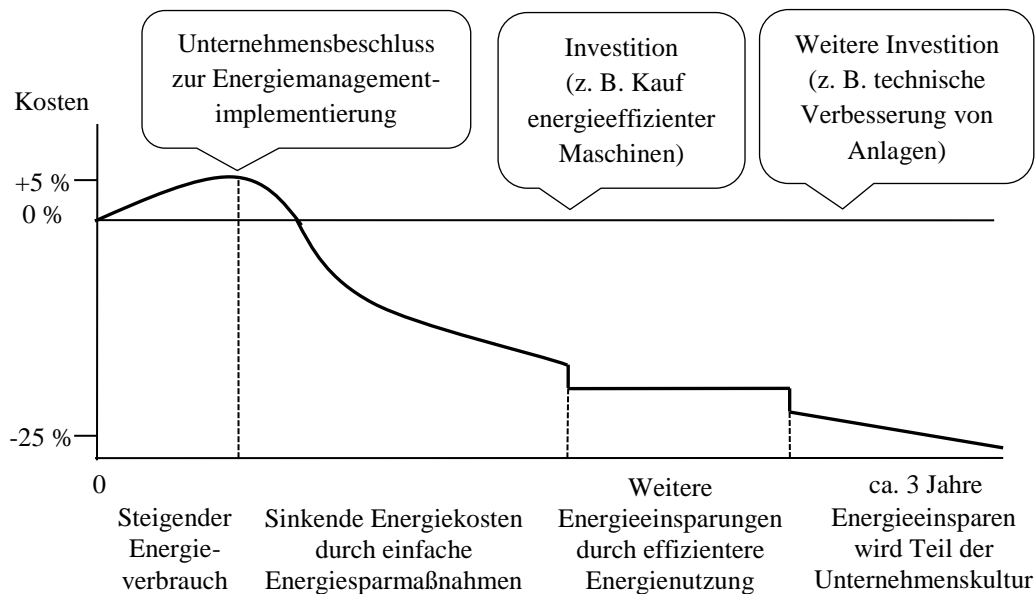


Abbildung 2-15: Kostensenkung durch ein EnMS (eigene Darstellung nach [8])

Ein in der Praxis umgesetztes EnMS nach DIN EN ISO 50001 ist eine gute Grundlage, um die Systematiken dieser Arbeit aufzusatteln bzw. von vorneherein miteinzuflechten. Insbesondere die Ergebnisse der Messung und Dokumentation, die Beschreibung der energetischen Ausgangsbasis und die energetische Bewertung bilden auch die Basis zur Anwendung der eigenen Systematiken. Außer der Norm sind in der Literatur zum Beispiel der vom Fraunhofer-IPA entwickelte Leitfaden TEEM (Total Energy Efficiency Management) [21] oder auch das Handbuch für betriebliches Energiemanagement der DENA [26] zu finden.

2.8 Ansatz von THIEDE

THIEDE beschreibt in der Veröffentlichung *A systematic method for increasing the energy and resource efficiency in manufacturing companies* eine vierstufige Methode, welche die Energie- und Ressourceneffizienz in Produktionsfabriken erhöhen soll. Die Methode arbeitet nach dem Prinzip des „Kontinuierlichen Verbesserungsprozesses“ und kann damit auch im Hinblick auf die DIN EN ISO 50001 genutzt werden. Die Anwendung der Methode soll im ersten Schritt keine detaillierten Daten erfordern und von jedem Unternehmen genutzt werden können. [51]

Stufe 1:

In Stufe 1 werden alle Verbraucher unter Berücksichtigung der Nennleistung und der Betriebszeit aufgenommen und im Rahmen einer Pareto-Analyse dargestellt. [51]

Die Pareto-Analyse sortiert verschiedene Werte nach ihrer Größe und liefert somit ein erstes Indiz dafür, wo die größten Potentiale, zum Beispiel in Bezug auf den Energieverbrauch liegen.

In THIEDES Beispiel machen sechs Maschinen über 50 % und 15 Maschinen etwa 80 % des abgeschätzten Verbrauches aus.¹¹ [51]

Stufe 2:

In Stufe 2 wird ein Energie-Portfolio aufgestellt (siehe Abbildung 2-16). Dieses dient als Werkzeug zur Klassifizierung der Verbraucher. Aus jeder Kategorie kann eine separate Strategie abgeleitet werden.

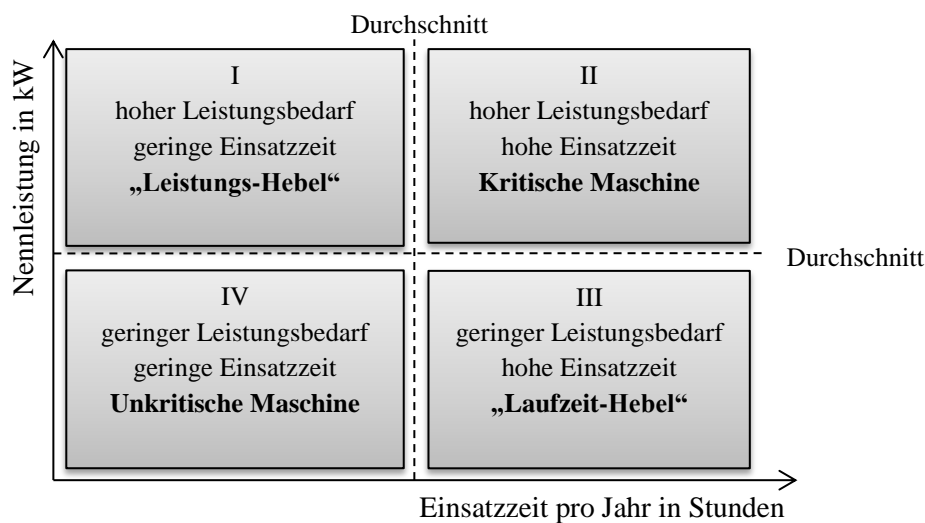


Abbildung 2-16: Energie-Portfolio (eigene Darstellung nach [51])

¹¹ In Kapitel 5.1.2 wird die Prato-Analyse ausführlicher behandelt.

- Kategorie I: Diese Verbraucher sind insbesondere wegen der Spitzenleistung für die Auslegung der Infrastruktur (Netze) interessant [51].
- Kategorie II: Die Verbraucher der Kategorie II sind die kritischsten Verbraucher, da sie den Großteil des Verbrauches verursachen. Eine Detailanalyse sollte hier – neben der Schätzung in Stufe 1 – auch in Form von Messungen durchgeführt werden (Abtastrate etwa 1 Sekunde). [51]
- Kategorie III: Diese Verbraucher haben infolge ihrer langen Betriebszeit einen signifikanten Einfluss auf den Jahresenergieverbrauch. Detaillierte Messungen sind nicht zwingend notwendig bzw. sind die Investition nicht Wert. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass diese Verbraucher mit ihrer langen Betriebszeit und einem geringen erforderlichen Investitionsvolumen ein Potential für Verbesserungen mit attraktiven Pay-back-Perioden (PBP) darstellen. [51]
- Kategorie IV: Diese Verbraucher sind im Kontext des Energieverbrauches weniger relevant. Es sollte kein weiterführender Aufwand für Detailbetrachtungen betrieben werden. [51]

Stufe 3:

Stufe 3 dient der Implementation. Auf Grundlage der Ergebnisse von Stufe 2 und anschließender Messungen können Verbesserungspotentiale abgeleitet werden. Da der Verbesserungsprozess kontinuierlich verläuft, muss die Maschinenliste regelmäßig aktualisiert werden. Änderungen, beispielsweise durchgeführte Maßnahmen oder verfügbare Messergebnisse, führen direkt zu einer Aktualisierung des Energie-Portfolios mit möglichen neuen Prioritäten für weitere Maßnahmen. Dadurch, dass sich die Qualität der Analyse automatisch im Laufe der Zeit erhöht, wird der Nachteil, der sich durch die Verwendung von nominalen Werten im ersten Schritt ergibt, ausgeglichen. [51]

Stufe 4:

Stufe 4 dient der Modellierung und Simulation von Energieströmen der Produktionssysteme. Die Daten, welche in den ersten drei Stufen erfasst wurden, sind eine ideale Voraussetzung für erweiterte Ansätze, wie die Modellierung und Simulation von Energie- und Stoffströmen in Fertigungssystemen. [51]

Der Ansatz, die Bestandsaufnahme in die Listung von Maschinendaten (mit dem Nachteil einer höheren Ungenauigkeit) und Messungen zu unterteilen, ist insofern interessant, als so eine höhere Geschwindigkeit für die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen erreicht werden kann.

2.9 **Ansatz von ERLACH**

ERLACH entwickelt in seiner Veröffentlichung *Energiewertstrom: der Weg zur energieeffizienten Fabrik* [20] die Energiewertstrommethode, welche einen ersten Schritt zur Bündelung von Lösungen zur Reduktion von Energieverbräuchen darstellen soll.

Die Systematik umfasst insgesamt drei Schritte [20]:

1. Energiewertstromanalyse (Erfassung des Istzustandes)
2. Energiewertstromdesign (Gestaltung des Sollkonzeptes)
3. Energiemanagement (Umsetzung der Maßnahmen)

Mit der Energiewertstromanalyse wird die innerbetriebliche Ausgangssituation erfasst. Strom-, Erdgas- und Druckluftverbräuche werden ermittelt. Daran anschließend werden mit dem Energiewertstromdesign anhand von acht Gestaltungsrichtlinien Maßnahmen zur Effizienzsteigerung hergeleitet, welche systematisch aufeinander aufbauen. Als Zielvision dient ein idealer Sollzustand für die energieoptimale Fabrik. Die Umsetzung kann durch ein Energiemanagementsystem unterstützt werden. [20]

Die Gestaltungsrichtlinien nach ERLACHS Energiewertstromdesign (Schritt 2) liefern gute Ansatzpunkte für eine weitere Nutzung im Rahmen dieser Arbeit:

1. „Ausrichtung auf den optimalen Betriebspunkt
2. Reduktion des Energiebedarfs im Normalbetrieb
3. Minimierung der An- und Abschaltverluste
4. Minimierung des Energieverbrauchs im Stand-by-Betrieb
5. Mehrfachnutzung des Energieeinsatzes
6. Ausgleich zwischen den Energieverbräuchen (Energieverbrauchsspitzen)
7. Festlegung einer energieoptimalen Abarbeitungsreihenfolge am größten Energieverbraucher
8. Synchronisation von Energiebereitstellung und Energieverbrauch“ [20]

2.10 Zusammenfassung und Abgrenzung zur eigenen Arbeit

Die ermittelten existierenden Verfahren, Systematiken und Methoden im Bereich der Energie-, Material- und Stoffeffizienz (Stand der Wissenschaft) werden in Abbildung 2-17 den Inhalten eigenen Arbeit gegenübergestellt.

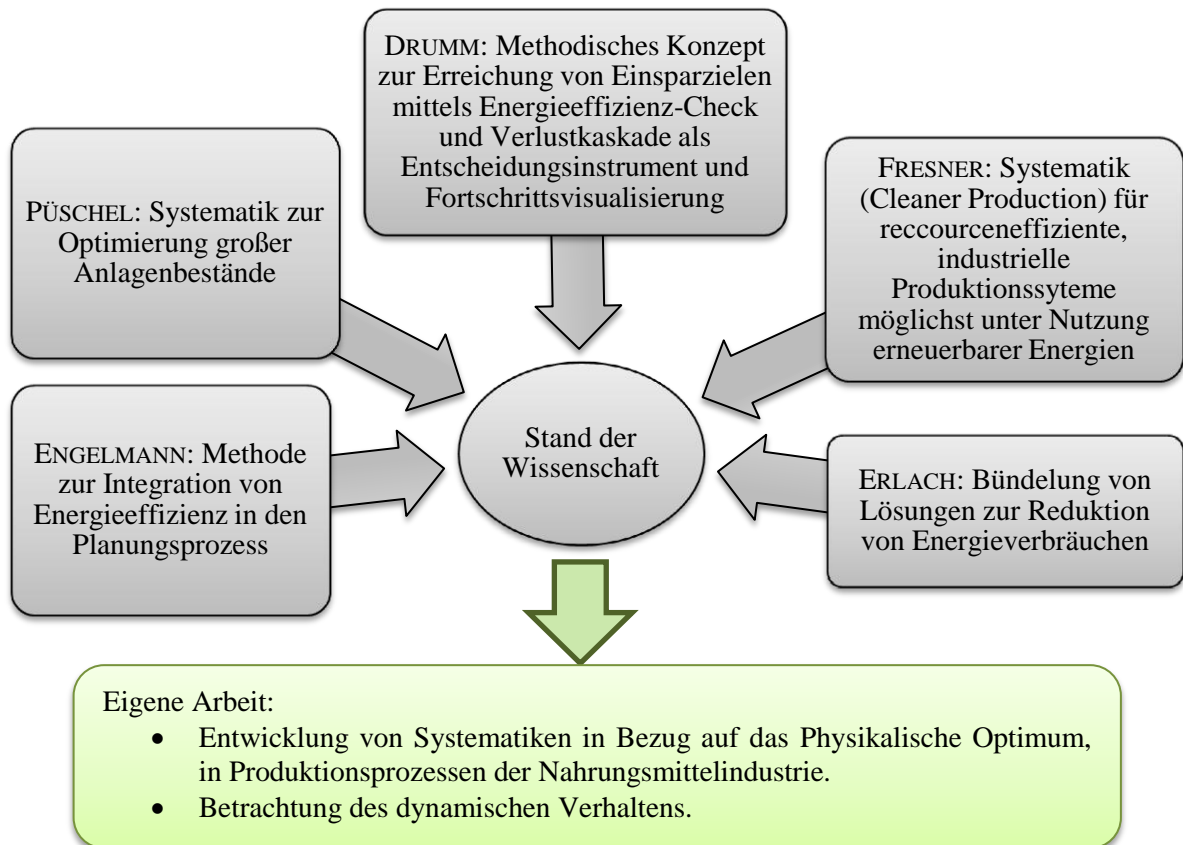


Abbildung 2-17: Stand der Wissenschaft und Abgrenzung zur eigenen Arbeit

Die untersuchte Literatur liefert erste Ansatzpunkte im Hinblick auf das Physikalische Optimum:

- Zur Steigerung der Energieeffizienz ergeben sich nach ERLACH zwei Ansatzpunkte. „Zum einen sind die Wandlungsverluste soweit wie physikalisch möglich zu eliminieren und zum anderen ist die Nutzenergie durch den Produktionsprozess effizienter zu nutzen, ihre jeweilige wertschöpfende Wirkung zu erhöhen.“ [20]
- „Was wäre der minimale Rohstoffverbrauch (aus physikalischem, mechanischem oder chemischem Blickwinkel) für Wasser und/oder Energie, wenn der Prozess eine 100%-ige Effizienz aufweisen würde, d.h. wenn keine praktischen, zeitlichen und örtlichen Beschränkungen vorhanden wären?“ [23].

Eine Definition des Physikalischen Optimums sowie eine Systematik zur Erreichung des Physikalischen Optimums konnten nicht gefunden werden und sollen daher Bestandteil dieser Arbeit sein.

Der eigentliche Produktionsprozess kann nur mit Hilfe der Prozessperipherie realisiert werden. Die Prozessperipherie wirkt sich somit auf die Energie- und Stoffeffizienz aus. BINDING unterscheidet beispielsweise zwischen direkter und indirekter Prozessperipherie [6]. ENGELMANN unterscheidet in der Prozessperipherie drei Hierarchieordnungen [19].

In dieser Arbeit soll der Produktionsprozess (bei BINDING Fertigungsprozess genannt) unter Berücksichtigung der dafür notwendigen technischen Medien (wie zum Beispiel die Kälte-, Wärme- und Druckluftversorgung) betrachtet werden.

Das Produkt selbst soll in dieser Arbeit nicht verändert, sondern mit den von der Produktionsabteilung bzw. vom Marketing vorgegebenen Merkmalen hergestellt werden. Zur Bewertung der Energie- und Stoffeffizienz sollen jedoch verschiedene Produktionsverfahren herangezogen werden, um ein Optimierungspotential für den Energie- und Stoffeinsatz herauszuarbeiten.

Im Rahmen der Lebenszyklusdarstellung, wie in Abbildung 2-18 dargestellt, wird in dieser Arbeit der Produktionsbetrieb unter Berücksichtigung des Physikalischen Optimums statisch und dynamisch bewertet. Die Planungsphase spielt insofern eine besondere Rolle, als dass bereits hier wichtige Randbedingungen für die Effizienz festgelegt werden. Damit ist der Prozess selbst gemeint (Auslegung: Design, Dimensionierung).

Im Produktionsbetrieb zeigt sich auf Basis der Planung und der tatsächlichen Fahrweise (dynamischer Betrieb) die tatsächliche Anlageneffizienz. Diese wird beispielsweise begründet durch die Reinigung, die Instandhaltung, Störungen und den Teillast-Betrieb.

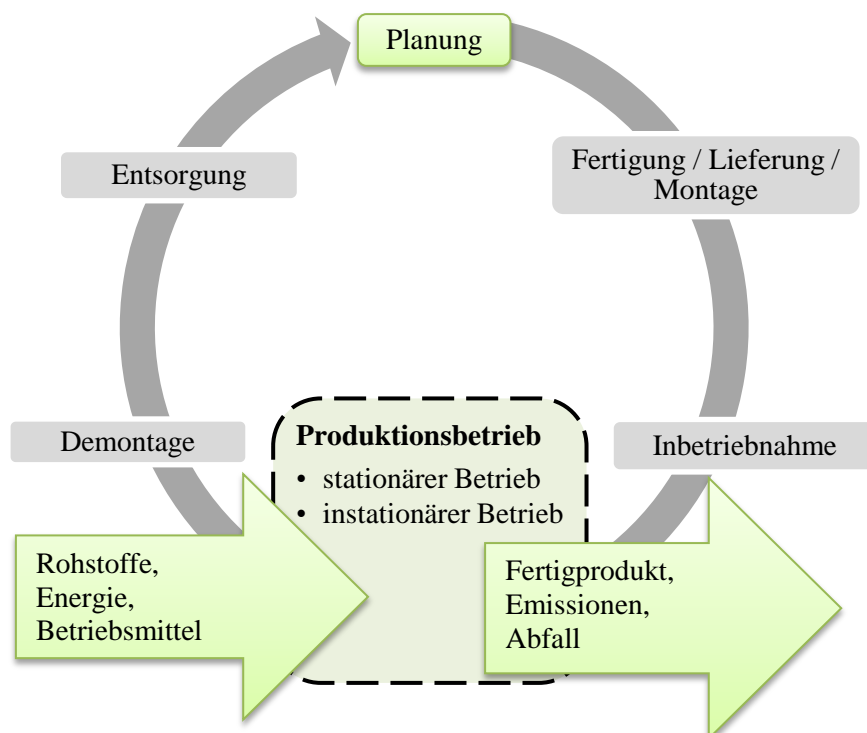


Abbildung 2-18: Lebenszyklus eines Produktionsprozesses

3 Grundlagen

In diesem Kapitel werden Grundlagen erläutert, welche zum Verständnis der nachfolgenden Kapitel beitragen.

3.1 Energie- und Stoffeffizienz

Die Effizienz von Systemen wird allgemein als das Verhältnis von Nutzen zum Aufwand beschrieben.

Die Energieeffizienz wird nach THIEDE [50] weiter differenziert. Als „generelle Energieeffizienz“ definiert THIEDE Folgendes:

$$\text{Energyefficiency}_{\text{general}} = \frac{\text{output of performance, goods, service or energy}}{\text{input of energy}} \quad \text{GI 3-1}$$

Als „Energieeffizienz auf Basis einer thermodynamischen Betrachtung“ bezeichnet THIEDE [50] das Verhältnis von „Energie-Output“ zu „Energie-Input“ eines Systems:

$$\text{Energyefficiency}_{\text{thermodynamical}} = \frac{\text{output energy}}{\text{input energy}} \quad \text{GI 3-2}$$

Für die „Energieeffizienz auf Basis eines Produktionssystems“ setzt Thiede [50] für den Nutzen die Produktionsmenge und für den Aufwand den „totalen Energie-Input“ ein:

$$\text{Energyefficiency}_{\text{manufacturing system}} = \frac{\text{production input}}{\text{total energy input}} \quad \text{GI 3-3}$$

3.1.1 Effizienzbewertung durch Messungen auf Werkbilanz

In Produktionsfabriken ist ein weiteres übliches Vorgehen, den Energie- oder Stoffverbrauch auf die erzeugte Produktionsmenge zu beziehen. Der Wert wird in dieser Arbeit (in Anlehnung an beispielsweise [13]) als Aufwandszahl e beschrieben. Der Aufwand kann zum Beispiel der Verbrauch an Endenergie Q_{EE} oder auch der Wasserverbrauch V_w bezogen auf die Produktionsmenge m_p sein:

$$e_{EE} = \frac{Q_{EE}}{m_p}, \quad e_w = \frac{V_w}{m_p} \quad \text{GI 3-4}$$

Der spezifische aktuelle Verbrauch AZ wird in einem weiteren Schritt mit dem Verbrauch in einem definierten Bezugszeitraum BZ , zum Beispiel dem Vorjahresergebnis, verglichen:

$$e_{\text{rel},w} = \frac{e_w^{AZ}}{e_w^{BZ}} \quad \text{GI 3-5}$$

Der Wert aus dem Bezugsjahr wird als 100 % spezifischer Verbrauch dargestellt, um die prozentuale Veränderung in den Folgezeiträumen darstellen zu können.

Abbildung 3-1 zeigt beispielhaft den spezifischen Wasser- und Endenergieverbrauch einer Produktionsfabrik in den Jahren 2008 bis 2013 verglichen mit dem Bezugsjahr 2007. Die Fabrik hat den Wasserverbrauch in sechs Jahren um 59 % und den Endenergieverbrauch um 14 % reduziert.

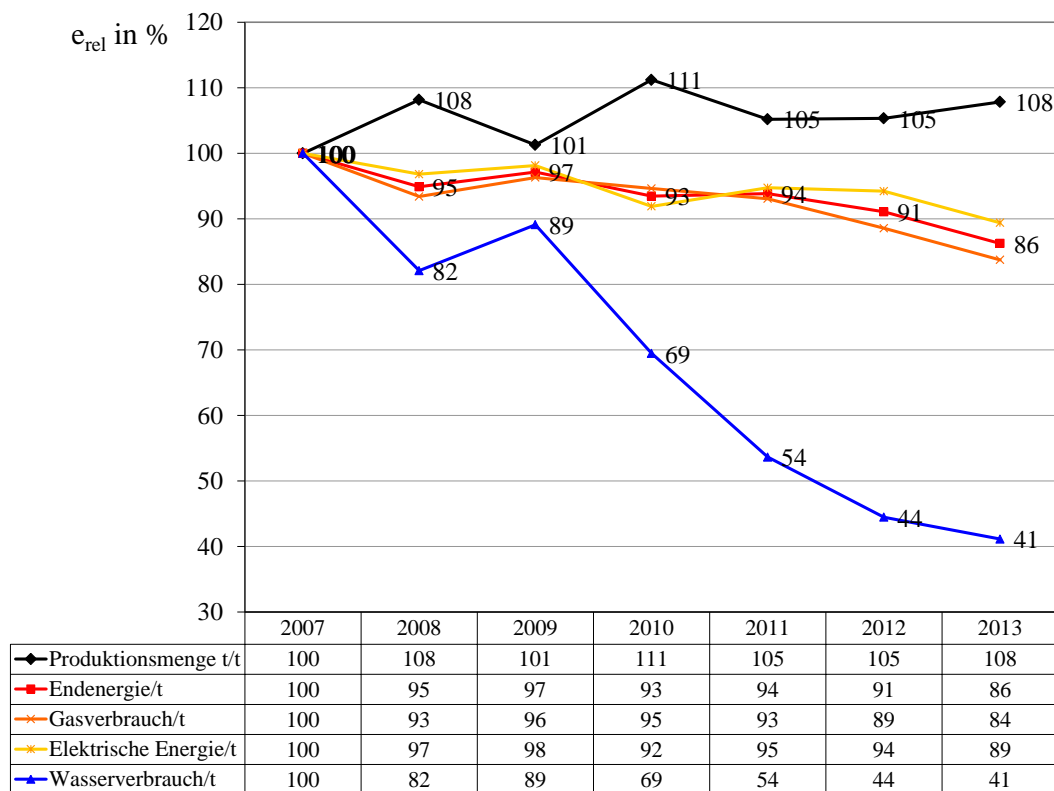


Abbildung 3-1: Spezifische Messung auf Werkbilanz (Beispiel einer Fabrik 2007–2013)

Effizienzsteigerungen auf Werkbilanz (nach Abbildung 3-1) darzustellen, birgt zwei Nachteile. Einerseits wird der spezifische Verbrauch nicht nur von den Optimierungsmaßnahmen beeinflusst, sondern auch von der Produktionsmenge. Ist die Produktionsmenge gering, steigt der spezifische Verbrauch und umgekehrt. Der Grund dafür sind die Bereitschaftsverluste, welche in Kapitel 5.5 näher behandelt werden. Ein solcher Fall ist in Abbildung 3-1 zu erkennen. Im Jahr 2009 sinkt die Produktionsmenge annähernd auf das Ausgangsniveau von 2007. Der spezifische Wasserverbrauch steigt im Vergleich zu 2008 wieder an. Aufgrund der Effizienzsteigerung ist der spezifische Wasserverbrauch 2009 jedoch um 11 % geringer als 2007.

Eine objektive Darstellung ist nur dann zielführend, wenn

1. Bilanzzeiträume mit gleichen Produktionsmengen verglichen werden,
2. bei Produkten unterschiedlicher Energie- und Stoffintensität das Verhältnis der produzierten Produktionsmengen konstant ist und
3. es in benachbarten Prozessen¹² nicht durch eine Prozessänderung zu einem Mehrverbrauch kommt.

¹² Eine Bilanzverzerrung geschieht dann, wenn durch eine Maßnahme eine Effizienzsteigerung erzielt wird, im gleichen Zeitraum jedoch ein Mehrverbrauch in einem benachbarten, mitbilanzierten Prozess zu verzeichnen ist.

Abbildung 3-2 zeigt einen Fall, bei dem durch eine Maßnahme die Effizienz eines Prozesses A erhöht wird, aber gleichzeitig ein Mehrverbrauch in Prozess B zu verzeichnen ist. Die Kreisfläche stellt die Energiemenge dar. Auch wenn die Maßnahme B für die Verbesserung eines Produktes gerechtfertigt ist, wird Prozess A in der Gesamtbilanz rekompensiert.

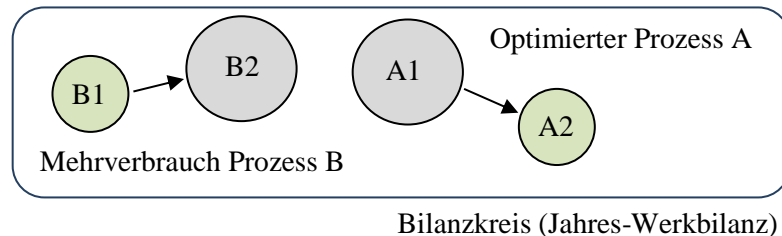


Abbildung 3-2: Prozessoptimierung bei gleichzeitigem Mehrverbrauch benachbarter Prozesse

3.1.2 Effizienzbewertung projektspezifisch auf Werkbilanz

Ein weiteres übliches Verfahren ist es, Effizienzprojekte projektbezogen zu erfassen und zu bewerten. Idealerweise sind die Auswirkungen der Maßnahmen nach der Umsetzung und Inbetriebnahme durch Messungen überprüft und dokumentiert worden. Eine beispielhafte Darstellung liefert Tabelle 3-1. Es werden alle Prozesse, welche optimiert wurden, zusammengefasst und in Relation zum Vorjahresergebnis bewertet.

Tabelle 3-1: Effizienzsteigerung projektbezogen (Beispiel)

Einsparung im Jahr „x“ per Quartal Q		Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Jahresergebnis
Übertrag aus Vorjahr		400	400	–	–	800
Projekt 1		0	300	300	300	900
Projekt 2		200	200	200	200	800
Projekt ...						
Projekt n						
Vorjahresverbrauch: 100.000	Reduktionsziel: 2 % = 2.000	600	900	500	500	Erreichtes Ergebnis: 2.500 = 2,5 %
Zielerreichung: 125 %						

Der Vorteil dieser Darstellung liegt darin, dass Effizienzprojekte objektiv durch Vergleich mit dem Vorjahresergebnis bewertet werden. Die Ergebnisse der einzelnen Projekte kommen voll zur Geltung.

Nachteil dieser Bewertung ist die häufig fehlende Konsistenz zur Darstellung nach Abbildung 3-1, weil die drei Bedingungen für die objektive Darstellung nach Kapitel 3.1.1 nicht erfüllt sind. Die gemessene Effizienz nach Abbildung 3-1 weist in diesem Fall eine Differenz zu dem Ergebnis der Bewertung nach Tabelle 3-1 auf.

3.2 Primärenergetische Bewertung

Für eine Gesamtbetrachtung verschiedener Prozesse ist es nötig, eine einheitliche Bezugseinheit zu definieren.

Für die Systematiken dieser Arbeit können folgende Bezugseinheiten Anwendung finden:

- Kosten pro Zeiteinheit in $\frac{\text{€}}{\tau}$
- Kosten pro Produktionsmenge in $\frac{\text{€}}{t_p}$
- Primärenergieverbrauch pro Zeiteinheit in $\frac{\text{kWh}_{\text{PE}}}{\tau}$
- Primärenergieverbrauch pro Produktionsmenge in $\frac{\text{kWh}_{\text{PE}}}{t_p}$

Zur Begriffsdefinition werden in Abbildung 3-3 die Energieformen und in Abbildung 3-4 die Materialformen aufgeführt. Diese sind von Belang, wenn es um die konkrete Abgrenzung der im Einzelnen betrachteten Prozesse geht.

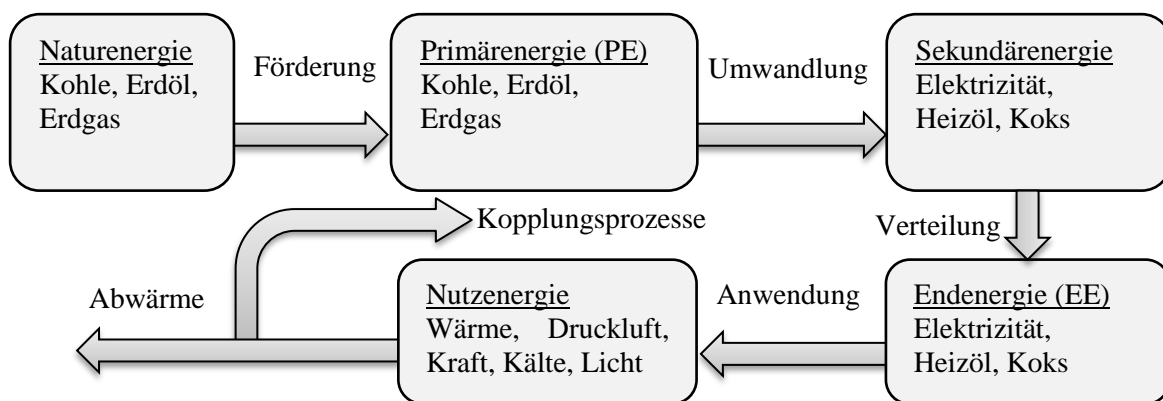


Abbildung 3-3: Energieformen (modifiziert nach [6])

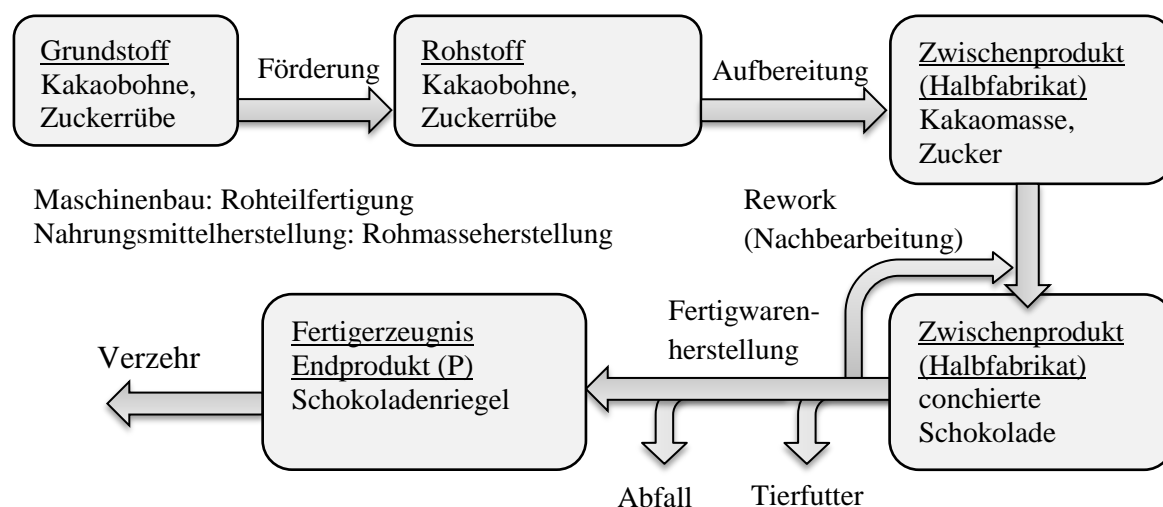


Abbildung 3-4: Materialformen (modifiziert nach [6])

Die Energieformen werden nach HESSELBACH [31] wie folgt definiert:

„Primärenergieträger kommen direkt in der Natur vor. Dies sind sowohl alle erneuerbaren Energiequellen (z. B. Wind, Sonne, Geothermie) als auch alle fossilen Energieträger wie Kohle, Erdöl, Erdgas oder auch Uran. Der größte Teil wird vor der Nutzung in Sekundär- und Endenergie gewandelt, ein Teil jedoch auch direkt als Nutzenergie eingesetzt (z. B. Kohle).“ [31]

„In der Regel werden fossile Primärenergieträger in Kraftwerken oder Raffinerien in Sekundärenergie umgewandelt. Aus Erdöl wird Benzin, Diesel und Heizöl, aus Erdgas oder Kohle werden Strom und ggf. Fernwärme erzeugt. Hierbei entstehen bereits die ersten Verluste in Form von ungenutzter Abwärme oder auch stofflichen Verlusten.“ [31]

„Endenergie ist die beim Verbraucher ankommende Energie. Dies können Strom (nach Leitungsverlusten in Abgrenzung zum Strom am Kraftwerk als Sekundärenergie) oder Erdgas und Heizöl sein. Die genutzte Endenergie ist letztlich das, was wir auf den Abrechnungen finden.“ [31]

„Nutzenergie stellt die letzte Stufe der Energie dar. Dies können Licht, Wärme, Kälte oder auch mechanische Energie sein. Die Stufe von der eingesetzten Endenergie bis zum eigentlichen Nutzen wird oftmals nicht genügend berücksichtigt. Der Verbraucher benötigt Wärme und kein Erdgas, und die Produktion benötigt Kühlenergie, aber nicht gezwungenermaßen aus Strom.“ [31]

Wenn Energiebilanzen auf verschiedenen Endenergien basieren¹³, ist die Rückrechnung und Bilanzierung auf Basis des Primärenergieverbrauches nötig. Hierfür sind in der Literatur Primärenergiefaktoren (auch kumulierter Energieaufwand genannt [27]) verfügbar. Zur Berechnung des Primärenergiefaktors wird die Primärenergie Q_{PE} durch die Endenergie Q_{EE} geteilt:

$$F_{PE} = \frac{Q_{PE}}{Q_{EE}} \quad \text{Gl 3-6}$$

Tabelle 3-2 gibt nach GROßKLOß [27] einen Überblick über einige Primärenergiefaktoren¹⁴.

Tabelle 3-2: Energieaufwand verschiedener Energieträger (vgl. [27])

Energieart		F_{PE} in $\frac{kWh_{PE}}{kWh_{EE}}$	Treibhausgase CO ₂ -Equivalent in $\frac{g}{kWh_{EE}}$
Bezugsgröße für Brennstoffe: unterer Heizwert H_i	Heizöl EL	1,11	302
	Erdgas H	1,12	244
	Flüssiggas	1,11	263
	Steinkohle	1,08	438
	Braunkohle	1,21	451
	Holzhackschnitzel	1,07	35
	Brennholz	1,01	6
	Holzpellets	1,16	41
Strom	Strommix	2,96	633

¹³ Ein Beispiel hierfür sei die gleichzeitige Bilanzierung von elektrischem Stromverbrauch und Gasverbrauch.

¹⁴ Detailliertere Informationen sind bei FRISCHKNECHT [25] zu finden.

3.3 Spezifische Wärmekapazität von Lebensmitteln

Angaben zur spezifischen Wärmekapazität von Lebensmitteln sind in der Literatur teilweise nur schwer oder gar nicht zu finden. Eine Möglichkeit, diesem Problem zu begegnen, ist die Berechnung mit Hilfe der spezifischen Wärmekapazität der Lebensmittelmassebestandteile, die entsprechenden Werte sind nahezu immer verfügbar. Die wichtigsten Bestandteile sind Proteine (p), Fette (f), Kohlenhydrate (k), Ballaststoffe (b), Asche (a) und Wasser (w).

TOLEDO [53] beschreibt eine Näherungsgleichung (nach Siebel) in welche der Wasseranteil, der Fettanteil und alle weiteren Bestandteile in die mittlere spezifische Wärmekapazität einfließen:

$$c_m = \mu_f \cdot 1674,72 + 837,36 \cdot (\mu_p + \mu_k + \mu_b + \mu_a) + \mu_w \cdot 4186,8 \text{ in } \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{Gl 3-7}$$

„Die mittels der Siebel-Gleichung abgeschätzten c-Werte stimmen gut mit den experimentell bestimmten Werten überein, wenn der Wassergehalt über 70 % beträgt und kein Fett vorhanden ist. [...] Unter der Bedingung, dass eine höhere Fehlertoleranz akzeptiert wird, genügt den meisten Nutzern die einfache Siebel-Gleichung.“ [53]

Eine exaktere Berechnung liefern CHOI und OKOS (beispielsweise beschrieben in SAHIN [47] und TOLEDO [53]). Die spezifische Wärmekapazität eines Lebensmittels kann demnach mit Hilfe der Massenbestandteile μ_i und deren spezifischen Wärmekapazitäten c_{pi} berechnet werden¹⁵:

$$c_p = \sum_{i=1}^n (\mu_i \cdot c_{pi}) = \mu_p \cdot c_{pp} + \mu_f \cdot c_{pf} + \mu_k \cdot c_{pk} + \mu_b \cdot c_{pb} + \mu_a \cdot c_{pa} + \mu_w \cdot c_{pw} \quad \text{Gl 3-8}$$

Die Näherungsgleichungen zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazitäten der Lebensmittelbestandteile zeigt Tabelle 3-3.

Tabelle 3-3: Spezifische Wärmekapazitäten von Nahrungsmittelbestandteilen [53]¹⁶

Bestandteil	Spezifische Wärmekapazität in J / kg · K
Protein:	$c_{pp} = 2008,2 + 1,2089 \cdot t - 1,3129 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$
Fett:	$c_{pf} = 1984,2 + 1,4733 \cdot t - 4,8008 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$
Kohlenhydrate:	$c_{pk} = 1548,8 + 1,9625 \cdot t - 5,9399 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$
Ballaststoffe:	$c_{pb} = 1845,9 + 1,9306 \cdot t - 4,6509 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$
Asche:	$c_{pa} = 1092,6 + 1,8896 \cdot t - 3,6817 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$
Wasser:	$c_{pw} = 4176,2 + 9,0862 \cdot 10^{-5} \cdot t - 5,4731 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$

„Die Gleichungen von CHOI und OKOS weisen eine höhere Genauigkeit für Produkte mit geringen Wassergehalten auf und der Gültigkeitsbereich dieser Gleichung erstreckt sich auf eine größere Produktvielfalt, da die Entwicklung dieser Gleichung auf einer umfangreichen Sammlung von publizierten Literaturwerten von verschiedenen Lebensmitteln basiert.“ [53]

¹⁵ Da Flüssigkeiten und Feststoffe i.d.R. als inkompressibel betrachtet werden können – und somit der Druck keinen Einfluss auf die spezifische Wärmekapazität ausübt – wird in der Literatur häufig die spezifische Wärmekapazität c (ohne den Index p) verwendet. Da c_p an dieser Stelle zitiert wurde, wird dies beibehalten.

¹⁶ Tabelle 3-3 wurde auf Basis von TOLEDO [53] für Nahrungsmittelbestandteile oberhalb des Gefrierpunktes erstellt. SAHIN [47] erweitert für Proteine, Fette, Kohlenhydrate und Asche den Gültigkeitsbereich auf (-40 °C bis 150 °C) und liefert weitere Näherungsgleichungen für Wasser.

4 Das Physikalische Optimum

Vergleichsmodelle werden in der Technik gerne angewendet, um einen Prozess vereinfacht zu beschreiben und darüber hinaus mit dem realen, verlustbehafteten Prozess zu vergleichen. Die bekannte Literatur verwendet für den Referenzprozess/-verbrauch verschiedene Begrifflichkeiten.

Die folgende Liste zeigt eine Auswahl von Bewertungsmöglichkeiten auf und verdeutlicht dadurch die Vielfalt:

- Theoretisch Berechneter Energie- und Materialeinsatz [6]
- Subjektiver existierender Idealzustand [6]
- Potentielles Best-Niveau [6]
- BDP: Best Demonstrated Practice (Bestmögliche Praxis) [15]
- OEO: Operational Energy Optimum (operatives-Energie-Optimum) [15]
- PEO: Plant Energy Optimum (Werk-Energie-Optimum) [15]
- TEO: Theoretical Energy Optimum (Theoretisches-Energie-Optimum) [15]
- Spezifischer Energieverbrauch nach dem Stand der Technik [20]
- Spezifischer Energieverbrauch des besten Produktionsprozesses (Best in Class) [20]
- Best practice observed (geringster spezifischer Verbrauch der Fabrik bei Volllast) [41]
- Best practical means (geringster spezifischer Verbrauch der Fabrik unter Verwendung des Standes der Technik bei angemessenen Kosten) [41]
- BAT: Best available technology (geringster spezifischer Verbrauch der Fabrik unter Verwendung des Standes der Technik ohne Berücksichtigung der Kosten) [41]
- BVT: Beste verfügbare Technik¹⁷

Die aufgeführten Bewertungsmodelle dienen als methodischer Ansatz, um den Energieverbrauch zu reduzieren. Der Fokus auf den ursächlich nötigen Verbrauch eines Prozesses – definiert durch das Physikalische Optimum – ist nicht zu erkennen. Somit müsste in diesen Fällen vielmehr von „Verbesserung“ gesprochen werden.

Optimierung bedeutet, das Optimum eines Prozesses zu definieren und diesen anschließend auf sein Optimum hin zu gestalten. Umso erstaunlicher ist es, dass das Optimum eines Prozesses in vielen Fällen nicht bekannt ist.

In dieser Arbeit wird das „Physikalische Optimum“ PhO als Referenzprozess definiert.

¹⁷ Im Rahmen der europäischen *Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung* (IVU), die Vorgaben für die Genehmigung von Anlagen macht, sind zur Gestaltung des produktionsintegrierten Umweltschutzes Emissionsgrenzwerte entsprechend den besten verfügbaren Techniken (**BVT**; englisch: **BAT**) festzulegen. Die BVT werden in so genannten **BREF**-Dokumenten (**B**est **A**vailable **T**echnique **R**eferenz Documents) branchenbezogen konkretisiert. Die BVT sind von Bedeutung bei der Festlegung des Standes der Technik nach Bundesimmissionsschutzgesetz sowie Wasserhaushaltsgesetz. [35]

4.1 Definition

Das in dieser Arbeit definierte Physikalische Optimum PhO ist ein theoretisch optimaler Referenzprozess. Zur Beschreibung des Physikalischen Optimums werden weitere Naturwissenschaften, wie die Biologie und die Chemie, herangezogen. Die Physik nimmt nach BAUMANN [5] in Anspruch, die Gesetzmäßigkeiten der Naturwissenschaften Chemie und Biologie mit abzudecken. Effekte der Biologie und Chemie, welche für einen systematischen Ansatz in der Produktionstechnik abgeleitet werden können, sind physikalisch beschreibbar.

Das Physikalische Optimum PhO soll deshalb als Begriff, unter Berücksichtigung der Biologie und Chemie, wie in Abbildung 4-1 dargestellt, beibehalten werden.

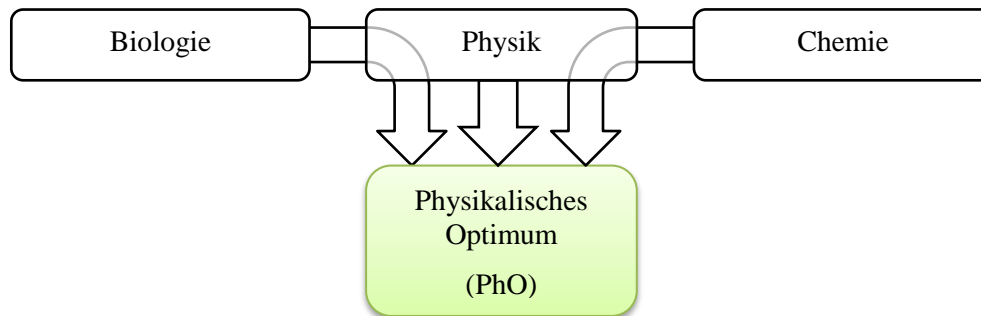


Abbildung 4-1: Ableiten des Physikalischen Optimums (PhO) aus den Naturwissenschaften

Als ein Beispiel für Optimierung aus dem Bereich der Biologie seien die Oryxantilopen angeführt. Über den Effekt des „Selective Brain Cooling“ sind die Antilopen in der Lage, den Teil ihres Blutes, welcher dem Gehirn zugeleitet wird, stärker herunter zu kühlen als das übrige Blut [38]. Diese Art der Selektion kann auf die Systematiken dieser Arbeit übertragen werden. Beispielsweise stellt sich bei der Betrachtung von Bestandsprozessen oft die Frage, ob einzelne Prozessschritte überhaupt noch benötigt werden. Erforderliche Prozessschritte werden auf ihr Physikalisches Optimum – im Hinblick auf die Effizienz des Gesamtsystems – untersucht.

Ein Beispiel aus dem Bereich der Chemie ist die Reaktion eines Brennstoffes mit Luftsauerstoff, welche für die Wärmenutzung (thermodynamisch, also physikalisch) möglichst vollständig sein sollte.

Das Physikalische Optimum beschreibt einen nach den in der Physik, Biologie und Chemie geltenden Randbedingungen optimalen Zustand. Es ist generell davon auszugehen, dass dieses Optimum nicht zu übertreffen ist.

Daraus wird abgeleitet:

Das Physikalische Optimum (PhO) ist für einen bestimmten Prozess ultimativ.

Insbesondere aus dem Gebiet der Thermodynamik ergeben sich für diese Arbeit Ansatzpunkte. Denn die Hauptsätze der Thermodynamik sind ein wesentlicher Schritt zur Bestimmung des Physikalischen Optimums.

Der nullte Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass Systeme in einem thermischen Gleichgewicht die gleiche Temperatur aufweisen. Wärme wird immer von einem Niveau höherer Temperatur zu einem Niveau niedriger Temperatur übertragen, es sei denn, es wird Energie aufgewendet. [9]

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik beschreibt die Energieerhaltung. Energien werden nicht verbraucht, sondern in andere Energieformen umgewandelt. [9]

Wenn in dieser Arbeit, wie in der Umgangssprache, von Energieverbrauch gesprochen wird, ist damit die Energieumwandlung gemeint. Darüber hinaus sollte für das Physikalische Optimum von physikalisch optimalem Bedarf und nicht von physikalisch optimalem Verbrauch gesprochen werden. Zur Vereinfachung sei dies an vielen Stellen vernachlässigt.

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik¹⁸ beschreibt die Irreversibilität der Energieumwandlung. Energien sind nur bedingt in andere Energieformen umwandelbar. Die rechnerische Erfassung der Irreversibilität ist über die Entropie möglich. In der Thermodynamik wird die Energie in Exergie und Anergie zerlegt, wobei Exergie jener wertvolle energetische Anteil ist, der in jede andere Energieform umgewandelt werden kann. Anergie kann nicht in Exergie umgewandelt werden. [9]

Für die Herleitung des Physikalischen Optimums gilt es, in Anlehnung an die Hauptsätze der Thermodynamik, die idealen thermodynamischen Vergleichsprozesse heranzuziehen. Diese Prozesse können sowohl reversibel als auch irreversibel sein.

Es gibt Energieformen, die bei einer Umwandlung, gemäß dem idealen Vergleichsprozess, keinen Verlust erfahren und somit reversibel (umkehrbar) sind. Ein Beispiel hierfür ist die Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische Energie.

Demgegenüber stehen viele Prozesse, welche irreversibel sind. So kann zum Beispiel aus elektrischer Energie Wärme erzeugt werden. Die Rück-Umwandlung von Wärme in elektrische Energie ist jedoch mit einem (i. d. R. hohen) Verlust verbunden.

In der Realität sind Umwandlungsprozesse zudem mit Reibung behaftet. Der daraus resultierende Verlust wird in der Thermodynamik als Dissipationsenergie bezeichnet. Die Dissipation ist ebenfalls ein irreversibler Vorgang. [9]

4.2 Eigenschaften

Im physikalischen optimalen Produktionsprozess existieren keine:

- Verluste durch instationäre Fahrweise (Teillastverluste)
 - ungeplante Stillstände
 - Teillastverluste der Anlage
 - Unterbrechung für Reinigung und Instandhaltung
- Produktausschüsse (Rework, Tierfutter, Abfall)
- Wärmeverluste an der Anlagenoberfläche (Konvektion und Wärmestrahlung)
- Dissipationsverluste (Reibung)
- Veränderungen der potentiellen und kinetischen Energie in Bezug auf den Produktfluss
- ungewollten chemischen Veränderungen des Produktes
- Massendefekte

Darüber hinaus existieren im physikalischen Optimalfall keine energetischen und stofflichen Aufwände für die Lagerung der Rohstoffe. In einer realen Nahrungsmittelfabrik hingegen sind Rührwerke zur Aufrechterhaltung homogener Phasen und die Temperierung (ob Kühlung oder Beheizung) von Rohstoffen erforderlich.

¹⁸ Der Dritte Hauptsatz der Thermodynamik wird beispielsweise in [9] beschrieben, soll in dieser Arbeit jedoch keine weitere Anwendung finden.

Das Physikalische Optimum ist immer abhängig von dem betrachteten Prozess. Unterschiedliche Prozesse, welche beide das gleiche Ergebnis (Produkt) erzeugen können, können unterschiedliche optimale Verbräuche aufweisen. Zwischen diesen Zuständen können weitere Zustände (Entwicklungsschritte) klassifiziert werden. Der Anlagenbestand kann optimiert oder gar eine neue Fabrik gebaut (Greenfield) werden.

Der Vorteil, den realen Prozess mit dem Physikalischen Optimum zu vergleichen, besteht darin, dass der Referenzpunkt (das Physikalische Optimum) nicht unterschritten werden kann, solange die physikalischen Gesetze gelten. Somit ist ausgeschlossen, dass zu einem späteren Zeitpunkt – zu dem der Stand der Technik fortgeschritten ist – ein neuer Referenzpunkt bestimmt werden muss.

Als erstes Beispiel für die notwendige Veränderung von Referenzpunkten seien die Effizienzklassen Eff von Elektromotoren (siehe Tabelle 4-1) angeführt. Im Rahmen des Fortschritts wurden Elektromotoren der Effizienzkategorie 1 zunächst als IE2 definiert, um eine Bewertung (darüber hinaus verbesserter Motoren) auf IE3 und IE4 zu ermöglichen [57].

Tabelle 4-1: Verschiedene Definitionen von Motor-Effizienzklassen (vgl. [57])

Motor-effizienz-klasse	Inter-national	United States	EU (altes System 1998)	EU (neues System 1998)	China	Australien
Premium	IE3	NEMA Premium	–	IE3		
Hoch	IE2	EPAAct	Eff1	IE2	Grade 1	AU2006 MEPS
Standard	IE1	–	Eff2	IE1	Grade 2	AU2002 MEPS
unter Standard	–	–	Eff3		Grade 3	

Ein weiteres Beispiel sind Haushaltsgeräte, welche mittlerweile oberhalb der Effizienzkategorie A mit A+ bis A+++ bewertet werden [45].

Abbildung 4-2 zeigt das Physikalische Optimum PhO im Vergleich zu bereits bekannten Referenzprozessen. Das Physikalische Optimum trennt als idealer Grenzwert das Perpetuum Mobile von den in der Realität umsetzbaren Prozessen. Ein real umsetzbares Perpetuum Mobile wird durch die Hauptsätze der Thermodynamik widerlegt [29]. Das Perpetuum Mobile ist somit auch ein Gedankenmodell für einen idealen Prozess, welches jedoch – auch als Grenzwert – nicht umsetzbar ist.

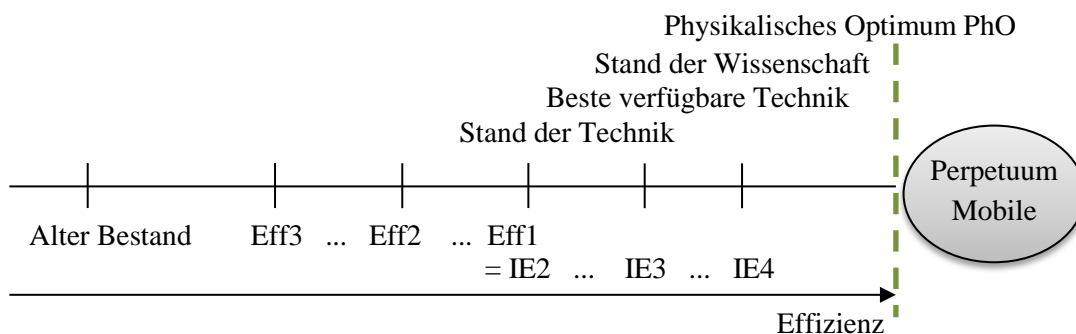


Abbildung 4-2: Das Physikalische Optimum im Vergleich zu bekannten Referenzprozessen

4.3 Berechnung

Der bilanzierte Gesamtprozess setzt sich nach Abbildung 4-3 aus mehreren Teilprozessen p zusammen. Sowohl interne als auch externe Kopplungsprozesse¹⁹ deuten an, dass der Energie- und Stoffaufwand sowohl innerhalb eines Gesamtprozesses IKP als auch durch eine externe Prozesskopplung EKP wiedergenutzt werden kann.

Die Definition und Berücksichtigung einer Bilanzgrenze ist für die Betrachtung des Physikalischen Optimums elementar.

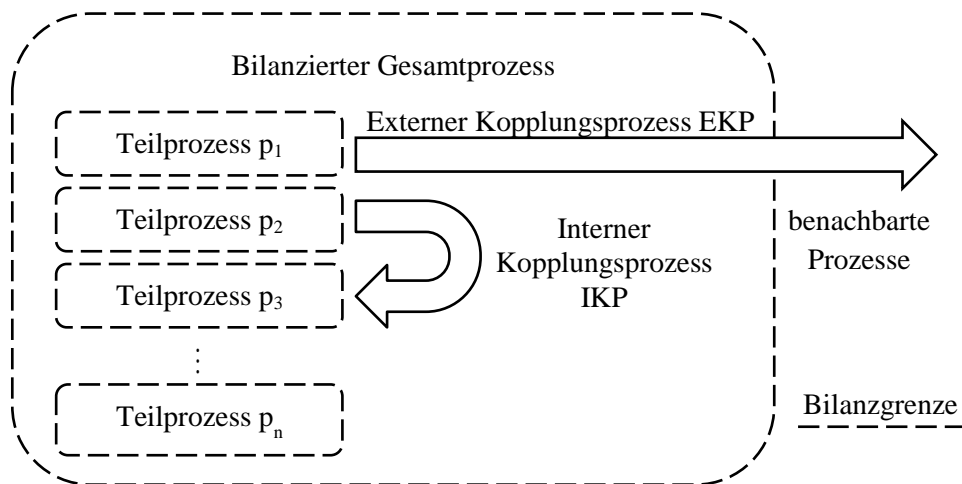


Abbildung 4-3: Bilanzierter Gesamtprozess mit Teilprozessen

Das Physikalische Optimum des bilanzierten Gesamtprozesses wird durch die Physikalischen Optima der einzelnen Teilprozesse p bedingt und errechnet sich aus der Summe der einzelnen physikalisch optimalen Verbräuche abzüglich der Effizienzsteigerung durch Kopplungsprozesse.

$$\begin{aligned}
 V_{\text{PhO}} &= V_{\text{PhO},p1} + V_{\text{PhO},p2} + \dots + V_{\text{PhO},pn} - V_{\text{IKP}} - V_{\text{EKP}} \\
 &= \sum_{p=1}^n (V_{\text{PhO},p}) - V_{\text{IKP}} - V_{\text{EKP}}
 \end{aligned}
 \tag{GI 4-1}$$

Für die Anwendung des Physikalischen Optimums (vgl. beispielsweise Kapitel 4.5 und Kapitel 5) sind die Prozesse soweit in Teilprozesse zu zerlegen, dass adäquate Vergleichsprozesse zur Bewertung herangezogen werden können.

¹⁹ Kopplungsprozesse werden in Kapitel 5.4 näher behandelt.

Der Prozesswirkungsgrad eines Teilprozesses ist das Produkt seiner Einzelwirkungsgrade i:

$$V_{\text{PhO,p}} = V_p \cdot \prod_{i=1}^n (\eta_i) \quad \text{Gl 4-2}$$

Um den physikalisch optimalen Prozess mit einem realen Prozess zu vergleichen, wird der PhO-Faktor F_{PhO} definiert.

Der PhO-Faktor F_{PhO} ist der Quotient aus dem Verbrauch eines Prozesses V und dem Verbrauch des Prozesses im physikalischen Optimalfall V_{PhO} . Der PhO-Faktor zeigt somit den Mehrverbrauch eines Prozesses im Vergleich zum Physikalischen Optimum an. Im physikalischen Optimalfall ist der PhO-Faktor gleich eins:

$$F_{\text{PhO}} = \frac{V}{V_{\text{PhO}}} > 1 \quad \text{Gl 4-3}$$

Zur Bestimmung des PhO-Faktors ist es erforderlich, dass der physikalisch optimale Verbrauch nicht gleich null ist. Der PhO-Faktor würde in diesem Fall gegen unendlich streben:

$$\lim_{V_{\text{PhO}} \rightarrow 0} (F_{\text{PhO}}) = \lim_{V_{\text{PhO}} \rightarrow 0} \left(\frac{V}{V_{\text{PhO}}} \right) = \infty \quad \text{Gl 4-4}$$

Es ist jedoch denkbar, dass der physikalisch optimale Verbrauch einiger Prozesse bei null liegt. Ein Beispiel sei die Lagerung eines Mediums, welches zur Umgebungstemperatur eine Temperaturdifferenz aufweist. Das Medium ist im physikalischen Optimalfall adiabatisch isoliert. Unter diesen Bedingungen ist der PhO-Faktor nicht anwendbar.

Der PhO-Faktor bewertet den realen Prozess auf Basis des Physikalischen Optimums. Um die Bewertung durchführen zu können, ist es nötig – neben der Berechnung des Physikalischen Optimums – den realen Verbrauch messtechnisch zu erfassen²⁰.

²⁰ In Kapitel 5.1.1 (Messung oder Simulation als Grundlage der Bewertung) wird detaillierter auf die Messthematik eingegangen.

4.4 Abgrenzung zum Betriebswirtschaftlichen Optimum

Die Gesamtkosten²¹ K_{iv} als Funktion der Effizienz entsprechen der Summe der Investitionskosten K_i und der Verbrauchskosten K_v (Energie- und Stoffverbrauch) eines Prozesses:

$$K_{iv} = K_i + K_v \quad \text{GI 4-5}$$

Je höher die Investitionen für Anlageneffizienz sind, desto niedriger sind die Verbrauchskosten und umgekehrt. Geringe Verbrauchskosten resultieren aus niedrigen Verbräuchen und sind somit ein Maß für die Effizienz. Das „Betriebswirtschaftliche Optimum“ BwO ist das Minimum der Gesamtkosten:

$$\text{BwO} = \text{Min}(K_{iv}) \quad \text{GI 4-6}$$

Abbildung 4-4²² zeigt die Kostenfunktionen und das Betriebswirtschaftliche Optimum. Die Verbrauchskosten erreichen im physikalischen Optimalfall ihr Minimum. Die Investitionskosten hingegen gehen im physikalischen Optimalfall gegen unendlich. Die Gesamtkosten zur Erreichung des Physikalischen Optimums sind damit unendlich hoch:

$$K_{iv}(\text{PhO}) = \infty + \text{Min}(K_v) = \infty \quad \text{GI 4-7}$$

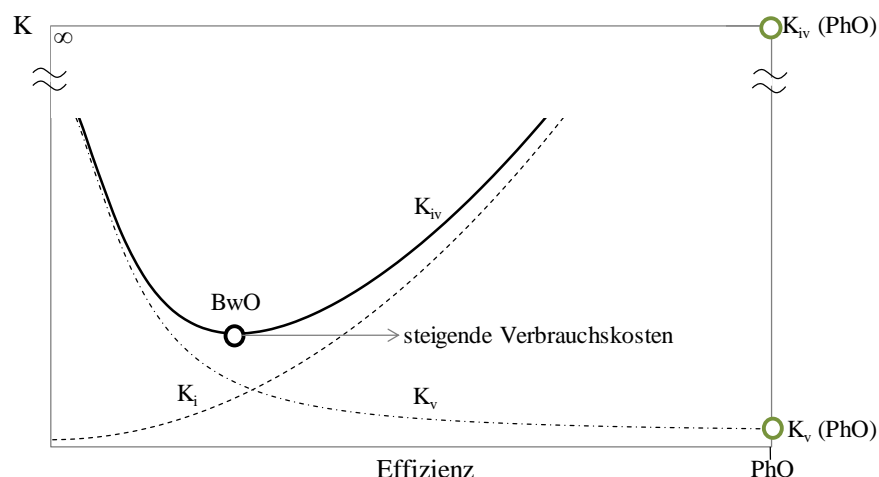


Abbildung 4-4: Physikalisches Optimum PhO und Betriebswirtschaftliches Optimum BwO

Steigende Verbrauchskosten (zum Beispiel durch Energiepreissteigerungen) führen dazu, dass sich das Betriebswirtschaftliche Optimum dem Physikalischen Optimum annähert. In diesem Fall sind höhere Investitionskosten nötig, um das Betriebswirtschaftliche Optimum zu erreichen.

Daraus wird abgeleitet:

1. Überproportional steigende Verbrauchskosten rechtfertigen höhere Investitionskosten, um in den Folgejahren das Betriebswirtschaftliche Optimum sicherzustellen.
2. Je höher die Energiekosten steigen, desto stärker wird der Fokus auf das Physikalische Optimum gerichtet werden.

²¹ Das Bilden von Gesamtkostenfunktionen ist in der Wirtschaftswissenschaft ein übliches Vorgehen (vgl. beispielsweise [39]), um Kostenoptima zu ermitteln.

²² Auch Abbildung 4-4 ist eine in der Wirtschaftswissenschaft übliche Darstellung (vgl. beispielsweise [39]) jedoch bislang ohne die Integration des Physikalischen Optimums.

4.5 Anwendungen

Das Physikalische Optimum kann als Zielgröße für die Effizienz von Anlagen genutzt werden. Dies gilt sowohl für die Planung als auch für den Betrieb.

Die folgenden Unterkapitel werden die für die Produktion wichtigsten Technische Medien TM in Bezug auf das Physikalische Optimum bewerten. Einerseits sind diese technischen Prozesse als Teilprozesse für die anschließende Gesamtsystembetrachtung wichtig. Andererseits dienen die auf das Physikalische Optimum hin bewerteten Technischen Medien als eigene Beispiele. Die technischen Medien versorgen den Produktionsprozess mit Nutzenergien und Stoffen. Die Bewertungen der Technischen Medien auf Basis messtechnischer Ergebnisse sind im Anhang (Seite 114 bis 116) zu finden.

Für die Technischen Medien stellt sich – selbst nach einer physikalisch optimalen Umwandlung – die Frage, ob der Produktionsprozess sie physikalisch optimal nutzt. Dieser Umstand wird bei der grundlegenden Bewertung der Technischen Medien zunächst vernachlässigt.

4.5.1 Elektromotoren

Elektromotoren wandeln elektrische Energie in mechanische Energie um und spielen in Nahrungsmittelfabriken eine bedeutende Rolle. Als Beispiele seien der Transport von Rohstoffen und Produkten, Antriebe von Pumpen sowie die Druckluft- und Kälteerzeugung genannt.

Der ideale Vorgang der Energieumwandlung kann als reversibel betrachtet werden, was bedeutet, dass die elektrische Energie vollständig in mechanische Energie umgewandelt wird. Das Physikalische Optimum ist in diesem Fall 100 %. Abbildung 4-5²³ veranschaulicht die Motoreffizienz in Abhängigkeit von der Motorengröße. Elektromotoren mit Leistungen über 100 kW weisen eine elektrische Effizienz über 90 % auf, was dem Physikalischen Optimum relativ nahe kommt. Bei kleineren Elektromotoren treten i. d. R. größere Verluste auf.

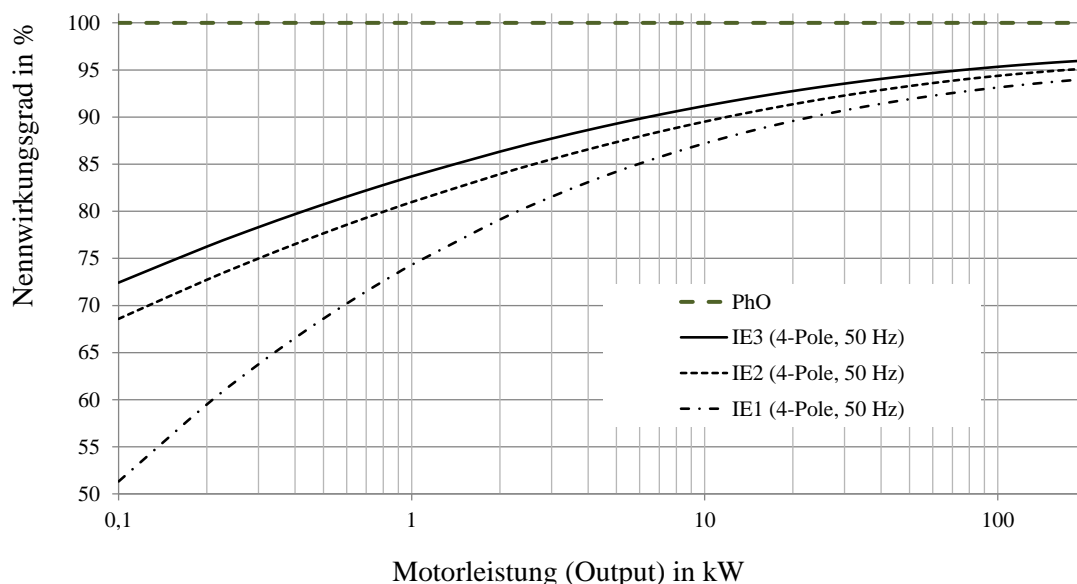


Abbildung 4-5: Effizienzklassen für 4-polige Elektromotoren (in Anlehnung an [10])

²³ WAIDE [57] behandelt in seiner Veröffentlichung auch die Motoreffizienz in Bezug auf Teillastzustände und weitere Verluste durch Frequenzumformer.

4.5.2 Wärmeübertrager

Ein Wärmeübertrager überträgt Energie in Form von Wärme vom Fluid mit der höheren Temperatur auf das Fluid der niedrigeren Temperatur ($T_1 > T_2$). Abbildung 4-6 skizziert einen Wärmeübertrager mit den beiden Fluidströmen \dot{m}_1 und \dot{m}_2 sowie den Ein- und Austrittstemperaturen T'_i und T''_i (es gilt: $i = 1, 2$).

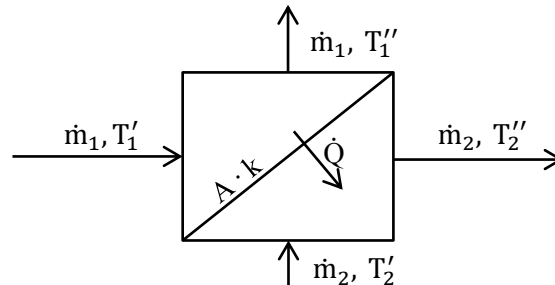


Abbildung 4-6: Bilanz eines Wärmeübertragers (in Anlehnung an [4])

Die Betriebscharakteristik von Wärmeübertragern soll im Folgenden dazu dienen, das Verhalten von Wärmeübertragern – im Hinblick auf das Physikalische Optimum – zu beschreiben. Hierzu werden vorab folgende Größen definiert:

Kapazitätsstrom eines Fluides [4]:

$$\dot{W} = \dot{m} \cdot c_p \quad \text{Gl 4-8}$$

Dimensionslose Temperaturänderung beider Fluide [4]:

$$\varepsilon_1 = \frac{T'_1 - T''_1}{T'_1 - T'_2} \quad \text{und} \quad \varepsilon_2 = \frac{T''_2 - T'_2}{T'_1 - T'_2} \quad \text{Gl 4-9}$$

Dimensionslose Übertragungsfähigkeit²⁴ [4]:

$$N_1 = \frac{k \cdot A}{\dot{W}_1} \quad \text{und} \quad N_2 = \frac{k \cdot A}{\dot{W}_2} \quad \text{Gl 4-10}$$

Verhältnis der Kapazitätsströme [4]:

$$C_1 = \frac{\dot{W}_1}{\dot{W}_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad \text{und} \quad C_2 = \frac{\dot{W}_2}{\dot{W}_1} = \frac{1}{C_1} \quad \text{Gl 4-11}$$

Der physikalisch optimale Wärmeübertrager ist durch folgende Randbedingungen charakterisiert:

1. adiabat zur Umgebung,
2. die Rohrreibung geht gegen null, so dass keine Druckdifferenz aufzubringen ist, um die Fluide strömen zu lassen, und
3. die Übertragungsfähigkeit strebt gegen unendlich ($(k \cdot A) \rightarrow \infty$).

²⁴ In der amerikanischen Literatur wird die dimensionslose Übertragungsfähigkeit N auch als NTU (Number of Transfer-Units) beschrieben. [4]

BÄHR [4] beschreibt schließlich die Betriebscharakteristik von Wärmeübertragern²⁵ in Abhängigkeit von der Stromführung der Fluide:

$$\epsilon_{i,\text{Gegenstrom}} = \frac{1 - e^{[(C_i-1)N_i]}}{1 - C_i \cdot e^{[(C_i-1)N_i]}} \quad \text{für } C_i \neq 1 \quad \text{Gl 4-12}$$

$$\epsilon_{i,\text{Gegenstrom}} = \frac{N_i}{N_i + 1} \quad \text{für } C = 1$$

$$\epsilon_{i,\text{Gleichstrom}} = \frac{1 - e^{[-(1+C_i)N_i]}}{1 + C_i} \quad \text{Gl 4-13}$$

Im physikalischen Optimalfall strebt die dimensionslose Übertragungsfähigkeit gegen unendlich ($N_i \rightarrow \infty$). Die dimensionslose Temperaturänderung der Fluide findet in diesem Punkt ihr Maximum (PhO = Max(ϵ_i)). Baehr [4] beschreibt diese Grenzwertbetrachtung für den Gegenstrom-Wärmeübertrager auf Basis von Gl 4-12:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} (\epsilon_{i,\text{Gegenstrom}}) = \begin{cases} 1 & \text{für } C_i \leq 1 \\ 1/C_i & \text{für } C_i > 1 \end{cases} \quad \text{Gl 4-14}$$

Die Grenzwertbetrachtung wird für den Gleichstrom-Wärmeübertrager auf Basis von Gl 4-13 durchgeführt (vgl. auch [4]):

$$\lim_{N \rightarrow \infty} (\epsilon_{i,\text{Gleichstrom}}) = \frac{1}{1 + C_i} \quad \text{Gl 4-15}$$

Abbildung 4-7 zeigt die Betriebscharakteristiken für einen Gegenstrom-Wärmeübertrager und einen Gleichstrom-Wärmeübertrager in Abhängigkeit von der dimensionslosen Übertragungsfähigkeit N_i und dem Verhältnis der Kapazitätsströme C_i auf Basis von Gl 4-12 und Gl 4-13. Vergleicht man beispielsweise den Gegenstrom-Wärmeübertrager mit dem Gleichstrom-Wärmeübertrager bei gleichen Kapazitätsströmen der Fluide ($C = 1$), erkennt man die Effektivität von Wärmeübertragern. Im physikalischen Optimalfall erreicht der Gegenstrom-Wärmeübertrager die dimensionslose Temperaturänderung von eins, der Gleichstrom-Wärmeübertrager hingegen nur 0,5.

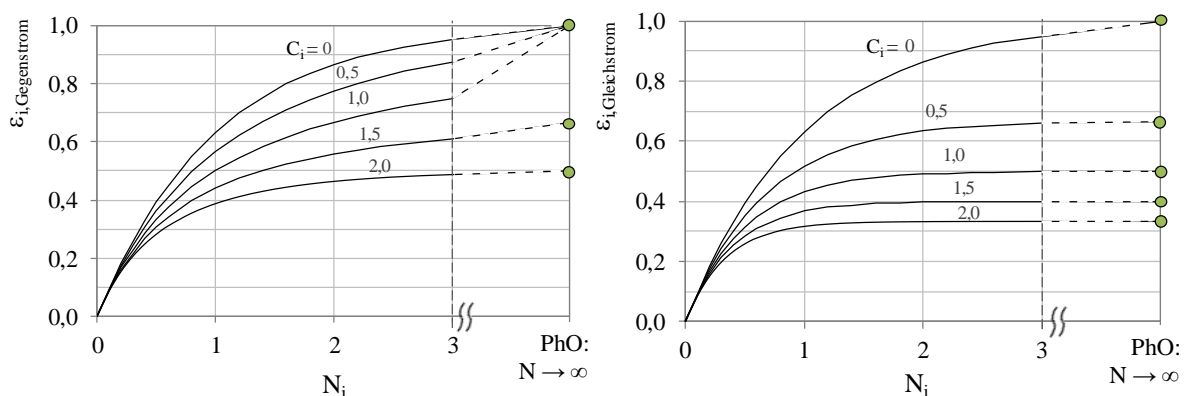


Abbildung 4-7: Betriebscharakteristik von Wärmeübertragern (auf Basis von [4])

²⁵ Der Betrachtungsbereich dieser Arbeit beschränkt sich auf Gegenstrom- bzw. Gleichstrom-Wärmeübertrager. BAEHR [4] beschreibt weitere Modelle.

Das Physikalische Optimum wird im Folgenden am Beispiel des Verdampfers einer Kältemaschine erläutert.

Um das Kühlmittel (Wasser) durch das Kältemittel abzukühlen, muss das Kältemittel kälter als das Wasser sein ($t_{\text{KM}} < t_{\text{W}}$). Der Wärmestrom \dot{Q} für Wärmeübertragung ist (beispielsweise nach CERBE [9]) das Produkt aus dem Wärmedurchgangskoeffizienten k , der Fläche des Wärmeübertragers A und der Temperaturdifferenz der sich gegenüberstehenden Fluide ΔT (beispielsweise Wasser und Kältemittel):

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T \quad \text{Gl 4-16}$$

Gl 4-17 beschreibt in die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz (vgl. beispielsweise [9]) beider Fluide:

$$\Delta T_{\text{ln}} = \frac{\Delta T_{\text{max}} - \Delta T_{\text{min}}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\text{max}}}{\Delta T_{\text{min}}}\right)} = \frac{(T_{\text{Wasser}}^{\text{r}} - T_{\text{KM}}^{\text{''}}) - (T_{\text{Wasser}}^{\text{v}} - T_{\text{KM}}^{\text{'}})}{\ln\left(\frac{T_{\text{Wasser}}^{\text{r}} - T_{\text{KM}}^{\text{''}}}{T_{\text{Wasser}}^{\text{v}} - T_{\text{KM}}^{\text{'}}}\right)} \quad \text{Gl 4-17}$$

Abbildung 4-8 zeigt die Temperaturverläufe des physikalisch optimalen und des realen Wärmeübertragers. In diesem Beispiel wird ein im Gegenstrom betriebener Wärmeübertrager betrachtet, wobei die Verdampfung des Kältemittels auf konstantem Temperaturniveau geschieht. Daraus folgt für die dimensionslose Temperaturänderung des Kältemittels: $\varepsilon_{\text{KM}} = 0$, während der Kapazitätsstrom gegen unendlich strebt ($\dot{W}_{\text{KM}} \rightarrow \infty$), was $N_{\text{KM}} = 0$ und $C_{\text{KM}} \rightarrow \infty$ zur Folge hat.

Für den betrachteten Wärmeübertrager erhält man im physikalischen Optimalfall auf Basis von Gl 4-9 folgendes Ergebnis:

$$\varepsilon_{\text{Wasser}} = \frac{T_{\text{Wasser}}^{\text{r}} - T_{\text{Wasser}}^{\text{v}}}{T_{\text{Wasser}}^{\text{r}} - T_{\text{KM}}^{\text{'}}} = 1 \quad \text{und} \quad \varepsilon_{\text{KM}} = \frac{T_{\text{KM}}^{\text{''}} - T_{\text{KM}}^{\text{'}}}{T_{\text{Wasser}}^{\text{r}} - T_{\text{KM}}^{\text{'}}} = 0 \quad \text{Gl 4-18}$$

Aus der dimensionslosen Temperaturänderung für Wasser nach Gl 4-18 folgt, dass die Vorlauftemperatur des Wassers gleich der Verdampfungstemperatur des Kältemittels ist ($T_{\text{Wasser}}^{\text{v}} = T_{\text{KM}}^{\text{'}}$). Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz strebt nach Gl 4-17 im physikalischen Optimalfall gegen null:

$$\lim_{(\Delta T_{\text{min}}) \rightarrow 0} (\Delta T_{\text{ln}}) = \lim_{(\Delta T_{\text{min}}) \rightarrow 0} \left[\frac{\Delta T_{\text{max}} - \Delta T_{\text{min}}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\text{max}}}{\Delta T_{\text{min}}}\right)} \right] = 0 \quad \text{Gl 4-19}$$

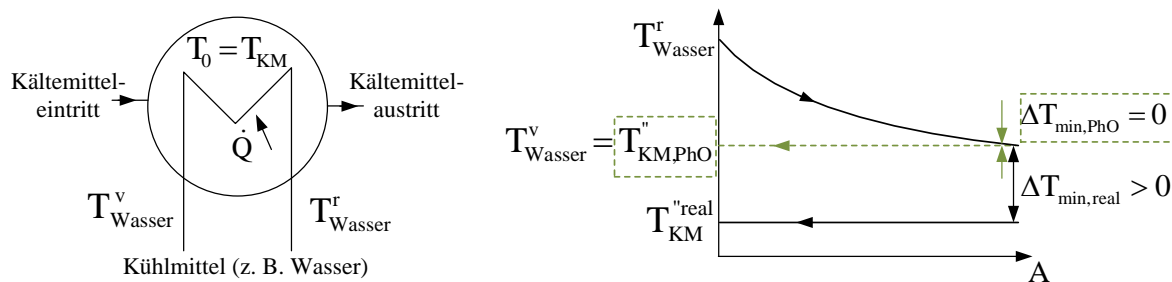


Abbildung 4-8: Wärmeübertrager am Beispiel einer Kältemaschine

4.5.3 Adiabate Systeme

Als adiabate werden in der Thermodynamik Systeme bezeichnet, welche trotz eines Temperaturunterschiedes zur Umgebung keine Wärme an die Umgebung abgeben und somit physikalisch optimal isoliert sind. In diesem Fall ist der Wärmedurchgangskoeffizient gleich null ($k \rightarrow 0$), wodurch der Wärmestrom gegen null geht.

$$\lim_{k \rightarrow 0}(\dot{Q}) = \lim_{k \rightarrow 0}(k \cdot A \cdot \Delta T) = 0 \quad \text{Gl 4-20}$$

Der Sachverhalt wird in Abbildung 4-9 anhand einer isolierten Rohrleitung veranschaulicht. Ein Fluid strömt durch die Rohrleitung und verändert seine Temperatur aufgrund der Temperaturdifferenz zur Umgebung t_u von t_1 nach t_2 . Die Abszisse beschreibt die Länge der Rohrleitung, welche als Fläche für die Wärmeübertragung wirksam ist. Für dieses Beispiel gilt: $t_1 > t_u$.

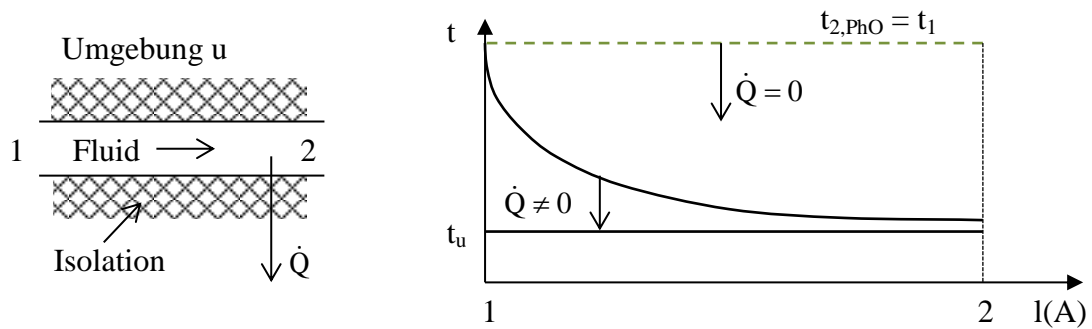


Abbildung 4-9: Temperaturverlauf in einer physikalisch optimal isolierten Rohrleitung

Die Temperaturdifferenz beschreibt in diesem Beispiel die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz des Fluides in der Rohrleitung zur Umgebung.

$$\Delta T_{\ln} = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}\right)} = \frac{(t_2 - t_u) - (t_1 - t_u)}{\ln\left(\frac{t_2 - t_u}{t_1 - t_u}\right)} \quad \text{Gl 4-21}$$

Wird der Wärmestrom durch Wärmeübertragung mit dem Wärmestrom, welcher dem Fluid von t_1 nach t_2 zugeführt wird gleichgesetzt (in Anlehnung an [58])

$$\dot{m} \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1) = A \cdot k \cdot \frac{(t_2 - t_u) - (t_1 - t_u)}{\ln\left(\frac{t_2 - t_u}{t_1 - t_u}\right)} \quad \text{Gl 4-22}$$

und löst man nach t_2 auf, zeigt Gl 4-23 den Temperaturverlauf als Funktion der Fläche $t_2 = f(A)$:

$$\Rightarrow t_2 = t_u + (t_1 - t_u) \cdot e^{-\frac{k \cdot A}{\dot{m} \cdot c_p}} \quad \text{Gl 4-23}$$

Die spezifische Wärmekapazität c_p , die Eintrittstemperatur t_1 und die Umgebungstemperatur t_u werden als konstant angenommen. Im physikalischen Optimalfall ist $t_2 = t_1$.

$$\lim_{k \rightarrow 0}(t_2) = \lim_{k \rightarrow 0} \left[t_u + (t_1 - t_u) \cdot e^{-\frac{k \cdot A}{\dot{m} \cdot c_p}} \right] = t_u + (t_1 - t_u) \cdot e^0 = t_1 \quad \text{Gl 4-24}$$

4.5.4 Kälteerzeugung

Die Kälteversorgung ist in Produktionsfabriken für verschiedene Anwendungen erforderlich. Einige dieser Anwendungen sind im Folgenden aufgeführt:

- Kühlen eines Produktes nach der Formgebung und/oder dem Mischens,
- Kühlen zur Aufrechterhaltung einer Lagertemperatur und
- Trocknungsprozesse (partielle Kondensation der Luftfeuchte).

In dieser Arbeit werden exemplarisch Kompressionskältemaschinen bewertet. Abbildung 4-10 zeigt den Kompressionskältemaschinenprozess mit Verdichter, Verflüssiger, Drossel und Verdampfer.

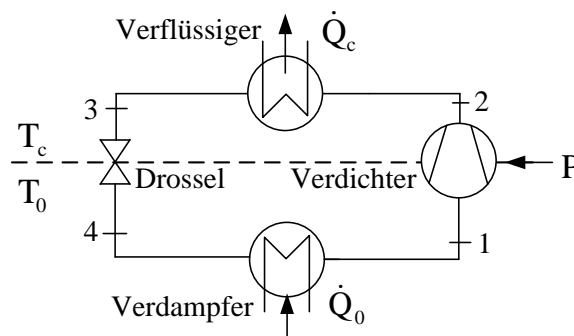


Abbildung 4-10: Fließschema eines Kältemaschinenprozesses²⁶

Das Kältemittel nimmt auf dem Verdampfungsdruckniveau T_0 , welches unterhalb der Umgebungstemperatur liegt, den Verdampfungswärmestrom (Verdampferleistung) \dot{Q}_0 auf (Schritt 4 \rightarrow 1). Der Verdichter komprimiert das Kältemittel auf das Verflüssigungsdruckniveau T_c , welches oberhalb der Umgebungstemperatur liegt (Schritt 1 \rightarrow 2). Der Verflüssigungswärmestrom (Verflüssigerleistung) \dot{Q}_c wird über den Verflüssiger vom Prozess abgegeben (Schritt 2 \rightarrow 3). In der Drossel wird das Kältemittel von dem Verflüssigungsdruckniveau auf das Verdampfungsdruckniveau gedrosselt (Schritt 3 \rightarrow 4).

Die abgeführte Verflüssigerleistung ist im idealen Kältemaschinenprozess gleich der Summe aus zugeführter Kälteleistung und Verdichterantriebsleistung P [14], [42].

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_0 + P \quad \text{Gl 4-25}$$

Das Qualitätsmerkmal einer Kältemaschine ist die Kälteleistungszahl ϵ_K . Die Kälteleistungszahl²⁷ (nach [14], [42]) ist definiert als Quotient aus der vom Kältemaschinenprozess aufgenommenen Kälteenergie (Nutzen) und der vom Verdichter aufgenommenen Antriebsleistung (Aufwand).

$$\epsilon_K = \frac{\dot{Q}_0}{P} \quad \text{Gl 4-26}$$

²⁶ Carl Linde (1842–1934) gilt als Mitbegründer der Kompressionskältemaschine [37]. Der Kältemaschinenkreisprozess wird beispielsweise in [9] beschrieben.

²⁷ Statt des Formelzeichens ϵ_K werden oft auch die Abkürzungen COP (Coefficient of Performance) oder EER (Energy Efficiency Ratio) (vgl. [14], [31]) verwendet. Für die allgemeine Bewertung des Kältemaschinenprozesses wird in der Literatur kein Index für die Antriebsleistung P angegeben.

4.5.4.1 Physikalisch optimaler Vergleichsprozess

In diesem Unterkapitel werden für den Kältemaschinenprozess zwei mögliche Vergleichsprozesse beschrieben: der „Abgewandelte Clausius-Rankine-Prozess“ nach [9] und der Carnotprozess nach [9] und [14].

Tabelle 4-2 zeigt die Zustandsänderungen der beiden Vergleichsprozesse und die Zustandsänderung des Realprozesses.

Tabelle 4-2: Vergleich zwischen Idealprozess und Realprozess für Kältemaschinen

Prozess-schritt	Realer Prozess	Abgewandelter Clausius-Rankine-Prozess	Carnot-prozess
Verdichtung (1 → 2)	Dissipation innerhalb des Verdichters ($s \neq \text{konst.}$)	isentropische Verdichtung ($s = \text{konst.}$)	isentropische Verdichtung ($s = \text{konst.}$)
Wärmeübertragung Verflüssiger (2 → 3)	druckverlustbehaftete Strömung ($p_c \neq \text{konst.}$)	isobare Verflüssigung ($p_c = \text{konst.}$)	isotherme Verflüssigung ($T_c = \text{konst.}$)
Drosselung (3 → 4)	nicht ideale Isolation ($h \neq \text{konst.}$) und nicht isentrop ($s \neq \text{konst.}$)	adiabate Drosselung ($h = \text{konst.}$) (Joule-Thomson-Effekt)	isentropische Drosselung ($s = \text{konst.}$)
Wärmeübertragung Verdampfer (4 → 1)	druckverlustbehaftete Strömung ($p_0 \neq \text{konst.}$)	isobare Verdampfung ($p_0 = \text{konst.}$)	isotherme Verdampfung ($T_0 = \text{konst.}$)

Abgewandelter Clausius-Rankine-Prozess für eine Kältemaschine:

Der Clausius-Rankine-Prozess kann für linkslaufende Kreisprozesse (Kältemaschinenprozesse) verwendet werden, mit dem Unterschied, dass in einer einfachen Kältemaschine die Expansion nicht in einer Turbine²⁸, sondern in einem Drosselventil stattfindet. Die Drosselung wird im abgewandelten Clausius-Rankine-Prozess als adiabat behandelt. (vgl. [9])

Carnotprozess für eine Kältemaschine:

Die Leistungszahl der Kältemaschine hat einen theoretisch-physikalischen Grenzwert, der von der tiefsten (Verdampfungstemperatur T_0) und der höchsten Temperatur (Verflüssigungstemperatur T_c) des Prozesses abhängt. Dieser Grenzwert wird durch den Carnotprozess beschrieben. Da die Bewertung einer Kältemaschine durch den Carnotprozess mit den Berechnungsgrößen Verdampfungstemperatur T_0 und Verflüssigungstemperatur T_c einfach darstellbar ist, soll der Carnotprozess in dieser Arbeit als optimaler Vergleichsprozess herangezogen werden. Abbildung 4-11 zeigt den Carnotprozess der Kältemaschine im T-s-Diagramm, wobei P_c die theoretische Antriebsleistung nach dem Carnotprozess ist. Wie in Abbildung 4-8 bereits dargestellt, ist im physikalischen Optimalfall die Verdampfungstemperatur gleich der Vorlauftemperatur des Kühlmittels. In diesem Fall wäre die Antriebsleistung $P_{c,PhO}$ wegen der höheren Verdampfungstemperatur kleiner als P_c ($T_{0,PhO} > T_0 \rightarrow P_{c,PhO} < P_c$).

²⁸ In der Wissenschaft ist die Expansion in einer Turbine statt einer einfachen Drosselung in einem Kältemaschinenprozess bereits untersucht worden (vgl. beispielsweise [28], [32]). Dieser Prozess soll in dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet werden.

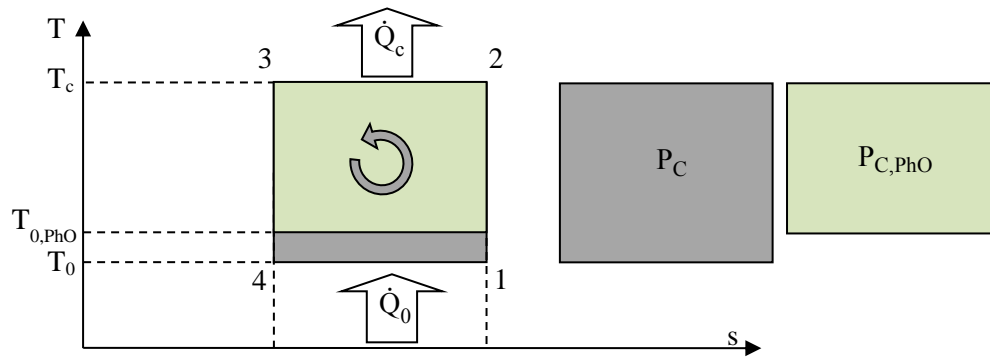
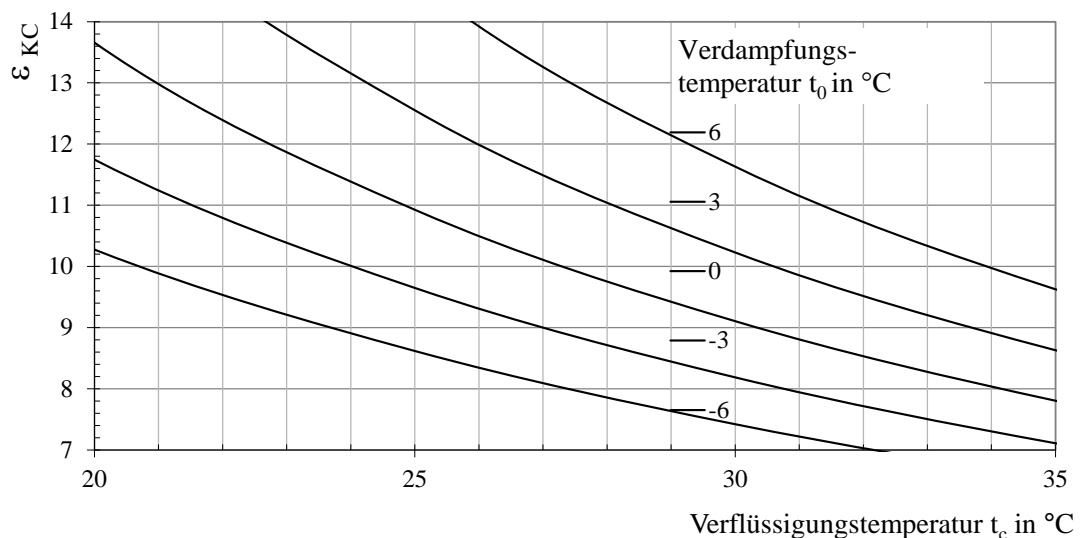


Abbildung 4-11: Carnotprozess der Kältemaschine im T-s-Diagramm (modifiziert nach [9])

Gl 4-27 zeigt die Berechnung der Kälteleistungszahl durch den Carnotprozess nach [9]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{KC} &= \frac{\dot{Q}_0}{P_C} = \frac{\dot{H}_1 - \dot{H}_4}{(\dot{H}_3 - \dot{H}_2) - (\dot{H}_1 - \dot{H}_4)} \\ &= \frac{T_0(\dot{s}_1 - \dot{s}_4)}{T_c(\dot{s}_3 - \dot{s}_2) - T_0(\dot{s}_1 - \dot{s}_4)} = \frac{T_0}{T_c - T_0} \end{aligned} \quad \text{Gl 4-27}$$

In Abbildung 4-12 ist die Kälteleistungszahl in Abhängigkeit von der Verflüssigungstemperatur und der Verdampfungstemperatur aufgetragen. Niedrige Verflüssigungstemperaturen sowie steigende Verdampfungstemperaturen haben eine höhere Kälteleistungszahl zur Folge und umgekehrt.

Abbildung 4-12: Leistungszahl (nach Carnotprozess) der Kältemaschine über t_c und t_0

4.5.4.2 Verluste gegenüber dem physikalisch optimalen Kältemaschinenprozess

Der reale Kältemaschinenprozess ist an mehreren Stellen verlustbehaftet. In dieser Arbeit werden drei wesentliche Verluste beschrieben:

1. reale Wärmeübertragung (Kälteversorgungssystem)
2. Verluste innerhalb des Kältemaschinenprozesses
3. Verluste durch zusätzlich nötige Betriebsmittel

Reale Wärmeübertragung:

Wird in die Systembilanz der Wärmeübertragungsprozess aufgenommen, soll der Begriff Kälteversorgungssystem verwendet werden.

Im Gegensatz zur physikalisch optimalen Wärmeübertragung (vgl. Kapitel 4.5.2) liegt die Verdampfungstemperatur der Kältemaschine unter der Vorlauftemperatur des Kälteträgers. Im physikalischen Optimalfall ist die Temperaturdifferenz gleich null ($t_{0,PhO} = t_v$).

Im Falle eines physikalisch optimalen Wärmeübertragers müsste die Kältemaschine die Kälteleistung über das Temperaturgefälle von t_v nach t_c , durch die Zufuhr der Antriebsleistung, überwinden. Es ist bei der realen Wärmeübertragung das Temperaturgefälle von t_0 nach t_c zu überwinden. Unter der Annahme, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Antriebsleistung und Verdampfungstemperatur bei konstanter Kälteleistung besteht, kann der Verlust P_{verl}^Z wie folgt berechnet werden (vgl. Abbildung 4-11):

$$\frac{P_{verl}^Z}{P_C} = \frac{(T_{0,PhO} - T_0)}{(T_c - T_0)} = \frac{(T_v - T_0)}{(T_c - T_0)} \quad \text{Gl 4-28}$$

Die physikalisch optimale Antriebsleistung des Kälteversorgungssystems kann durch die Antriebsleistung nach dem Carnotprozess abzüglich des Anteils für reale Wärmeübertragung P_{verl}^Z berechnet werden.

$$P_{PhO} = P_C - P_{verl}^Z \quad \text{Gl 4-29}$$

Verluste innerhalb des Kältemaschinenprozesses:

Der reale Kältemaschinenprozess ist im Vergleich zum Carnotprozess verlustbehaftet. Um den realen Prozess mit dem Physikalischen Optimum (Carnotprozess) vergleichen zu können, wird der Carnot-Gütegrad formuliert. Der Carnot-Gütegrad η_{KC} beschreibt das Verhältnis der realen (gemessenen) Leistungszahl $\varepsilon_{K,gemessen}$ zur theoretisch maximal erreichbaren Leistungszahl nach dem Carnotprozess ε_{KC} (vgl. [14]):

$$\eta_{KC} = \frac{\varepsilon_{K,gemessen}}{\varepsilon_{KC}} \quad \text{Gl 4-30}$$

Die gemessene Leistungszahl ist der Quotient aus gemessener Kälteleistung und gemessener Antriebsleistung:

$$\varepsilon_{K,gemessen} = \frac{\dot{Q}_0}{P_{el}} \quad \text{Gl 4-31}$$

Die Kälteleistung²⁹ \dot{Q}_0 berechnet sich mit Hilfe der Größen spezifische Wärmekapazität c_p , Temperaturdifferenz zwischen Rück- t_r und Vorlauftemperatur t_v und Massenstrom \dot{m} des Kühlmittels. Messtechnisch wird in vielen Fällen der Volumenstrom erfasst, welcher mit Hilfe der Massendichte ρ in den Massenstrom umgerechnet werden kann.

$$\dot{Q}_0 = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_r - t_v) = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (t_r - t_v) \quad \text{Gl 4-32}$$

²⁹ Der Verdampfer-Wärmeübertrager wird zur Umgebung als adiabat betrachtet.

Verluste durch zusätzlich nötige Betriebsmittel P_{el}^{BM} :

Neben dem Antriebsmotor des Verdichters zur Bereitstellung von Kälte in einer Kälteanlage (Kältenetz) werden zur Bereitstellung von Kälteenergie weitere Betriebsmittel benötigt (zusätzlich betriebene Betriebsmittel). Dazu gehören zum Beispiel der Antriebsmotor eines Verdunsterlüfters und dessen Wasserpumpe, die Pumpe für den Transport des Kühlmittels in die Fabrik sowie Lüftermotoren und Regelungstechnik.

Für die Untersuchung einer Kältemaschine sind folgende Messgrößen erforderlich, welche in Abbildung 4-13 veranschaulicht werden:

- Verdampfungstemperatur t_0 in °C
- Verflüssigungstemperatur³⁰ t_c in °C
- Stromaufnahme³¹ des Verdichters P_{el}^V in kW
- Stromaufnahme für zusätzlich betriebene Betriebsmittel³² P_{el}^{BM} in kW
- Kälteleistung \dot{Q}_0 in kW

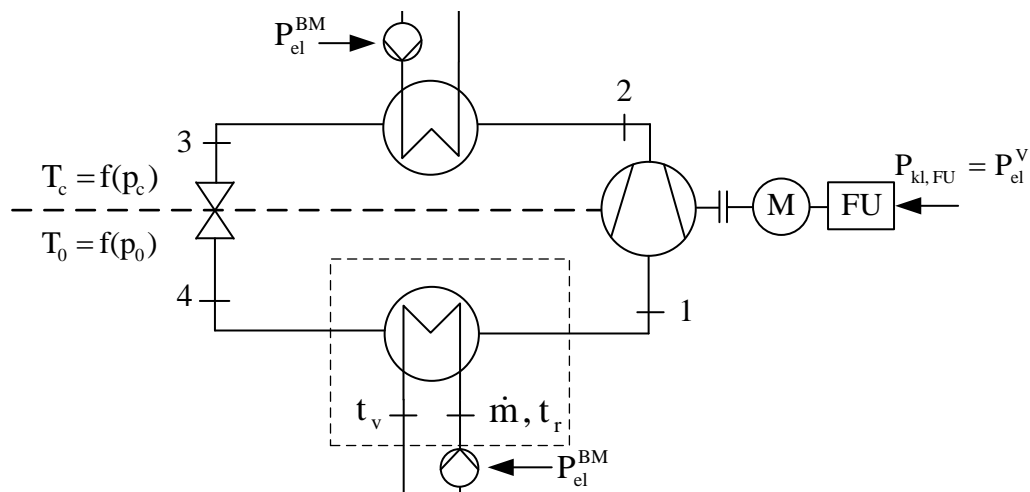


Abbildung 4-13: Messgrößen zur Bewertung eines Kälteversorgungssystems

Der PhO-Faktor³³ für den Kältemaschinenprozess K errechnet sich aus der zugeführten Stromaufnahme der Kältemaschine geteilt durch die Antriebsleistung nach dem Carnotprozesses:

$$F_{PhO,K}^K = \frac{P_{el}^V}{P_C} = \frac{234 \text{ kW}}{82,5 \text{ kW}} = 2,84 \quad \text{Gl 4-33}$$

³⁰ Die Verdampfungstemperatur ist zum Verdampfungsdruck im Nassdampfgebiet proportional und kann somit auch über Manometer bestimmt werden. Das Gleiche gilt für die Verflüssigungstemperatur.

³¹ Die Stromaufnahme einer Kältemaschine sollte vor dem Frequenzumformer FU gemessen werden, falls ein solcher vorhanden ist, um auch die Verluste durch diesen zu berücksichtigen.

³² Zusätzlich nötige Betriebsmittel sind in diesem Fall unter anderem Pumpen für den Kälteträgertransport sowie den Wassertransport zum Kühlturm und die Kühlturmventilatoren.

³³ Die Stromaufnahme des Verdichters P_{el}^V wurde messtechnisch bestimmt. Die Antriebsleistung nach dem Carnotprozess P_C wurde nach Gl 4-27 berechnet. Die hierfür erforderliche Verdampfungstemperatur T_0 , die Verflüssigungstemperatur T_c sowie die Kälteleistung \dot{Q}_0 wurden wiederum messtechnisch bestimmt. Ausführlichere Rechenschritte sind dem Anhang (Seite 114) zu entnehmen. Weitere Verluste wie beispielsweise der Transport zur Produktion wurden vernachlässigt.

Der PhO-Faktor³⁴ für das Kälteversorgungssystem berücksichtigt über den eigentlichen Kältemaschinenprozess hinaus auch die zusätzlich erforderlichen Betriebsmittel $P_{\text{verl}}^{\text{BM}}$ sowie den Verlust durch den Mehraufwand für die reale Wärmeübertragung $P_{\text{verl}}^{\text{Z}}$. Die Bezugsbasis ist die physikalisch optimale Antriebsleistung P_{PhO} .

$$F_{\text{PhO},K}^{\text{K*}} = \frac{P_{\text{el}}^{\text{V}} + P_{\text{el}}^{\text{BM}}}{P_{\text{PhO}}} = \frac{276,2 \text{ kW}}{(82,5 - 9,2) \text{ kW}} = 3,77 \quad \text{Gl 4-34}$$

Abbildung 4-14 zeigt beispielhaft die Verlustkaskade der Kälteversorgungseinheit in Form eines Sankey-Diagramms. Die Antriebsleistung nach dem Carnotprozess P_{C} entspricht dem Physikalischen Optimum für den Kältemaschinenprozess und ist deshalb auch in grün dargestellt.

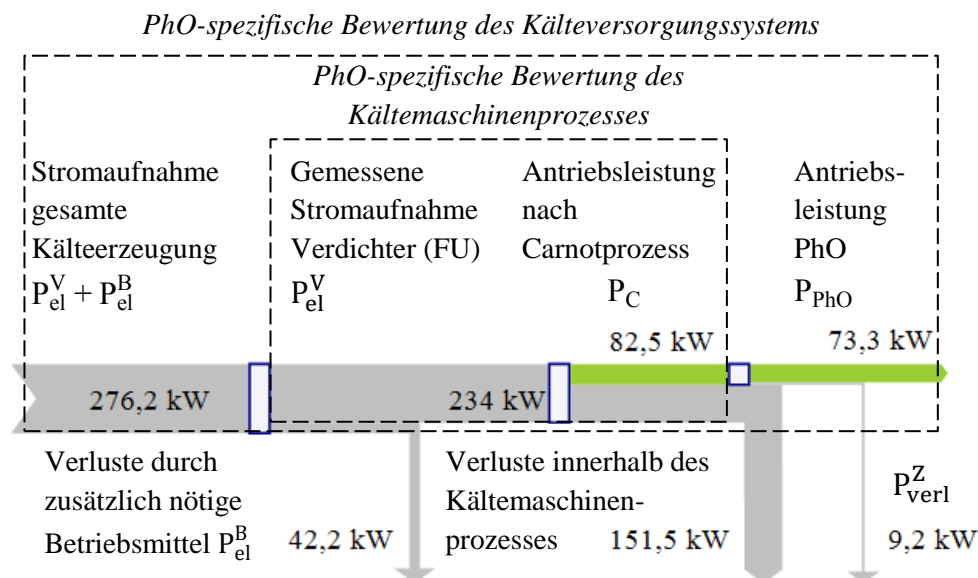


Abbildung 4-14: Energieverlustkaskade einer Kälteversorgungseinheit

Die Darstellung zeigt, wie wichtig die Abgrenzung der Systemgrenzen für die Bewertung eines Prozesses in Bezug auf das PhO ist. Der nächste gedankliche Schritt ist die Bewertung der späteren Nutzung der Technischen Medien im Produktionsprozess (vgl. Kapitel 5.3). Die Frage ist also, wie optimal die erzeugte Kälteenergie in der Produktion genutzt wird³⁵.

³⁴ Die physikalisch optimale Antriebsleistung P_{PhO} wird nach Gl 4-29 berechnet. Der hierfür notwendige Anteil für die reale Wärmeübertragung $P_{\text{verl}}^{\text{Z}}$ wurde nach Gl 4-28 berechnet. Die Stromaufnahme für zusätzlich betriebene Betriebsmittel $P_{\text{el}}^{\text{BM}}$ wurde messtechnisch bestimmt.

Weitere mögliche Verluste wie beispielsweise Wärmeverluste durch Rohrleitungswege wurden in Gl 4-34 vernachlässigt. In den weiterführenden Betrachtungen wird der Index K (ohne *) verwendet, unabhängig davon, ob der Bezug der Kältemaschinenprozess oder das Kälteversorgungssystem ist.

³⁵ Aus diesem Grund wurde in Gl 4-33 und Gl 4-34 der Index K sowohl tiefgestellt als auch hochgestellt. Das tiefgestellte K steht für die Betrachtung der Kälteenergie, welche sowohl für das Technische Medium selbst, als auch innerhalb eines Produktionsprozesses betrachtet werden kann. Der hochgestellte Index berücksichtigt das betrachtete System.

Betrachtung des Technischen Mediums Kälte K für die Kälteversorgungseinheit K: $F_{\text{PhO},K}^{\text{K}}$

Betrachtung des Technischen Mediums Kälte K für einen Produktionsprozess P: $F_{\text{PhO},K}^{\text{P}}$

4.5.5 Wärmeerzeuger

Der physikalisch optimale Wärmeerzeuger wird in Abbildung 4-15 anhand zweier Prozessschritte erläutert:

1. physikalisch optimaler Verbrennungsprozess in optimaler Brennkammer
2. physikalisch optimaler Wärmeübertrager

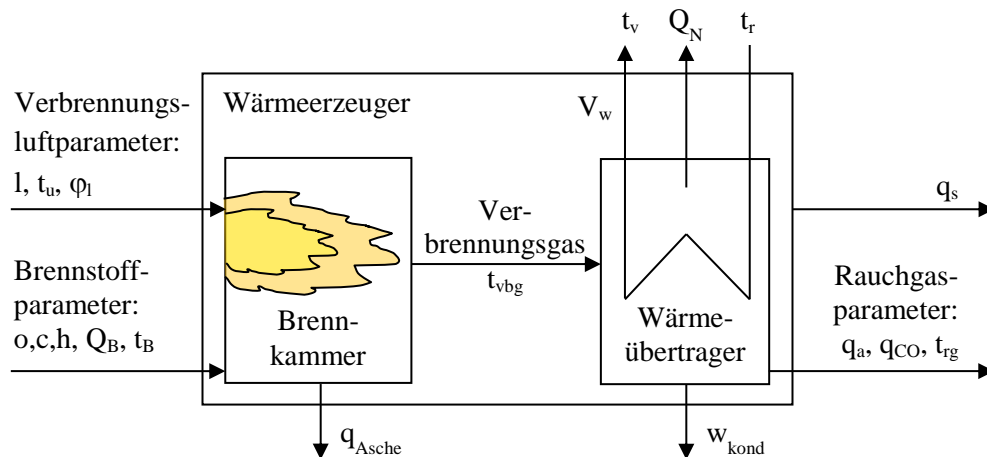


Abbildung 4-15: Blockschaltbild eines physikalisch optimalen Wärmeerzeugers

Beim Wirkungsgrad der Wärmeerzeugers wird nach [9] zwischen „Feuerungstechnischem Wirkungsgrad“ η_f und Kesselwirkungsgrad η_k unterschieden.

Der Feuerungstechnische Wirkungsgrad (vgl. [9]) berücksichtigt die Abgasverluste q_a , sowie die Verluste durch Unverbranntes im Abgas q_{CO} und in der Asche q_{Asche} .

$$\eta_f = 1 - q_a - q_{CO} - q_{Asche} \quad \text{Gl 4-35}$$

Der Kesselwirkungsgrad³⁶ (vgl. [36]) berechnet sich durch das Verhältnis von abgeführter Nutzwärmeenergie Q_N und aufgewendeter Brennerbelastung Q_B . Damit bezieht der Kesselwirkungsgrad die Wärmeverluste an der äußeren Kesseloberfläche, durch Strahlung und Konvektion q_s , mit ein.

$$\eta_k = \frac{Q_N}{Q_B} = \frac{V_W \cdot \rho_w \cdot c_{p,w} \cdot (t_v - t_r)}{m_B \cdot H_s} = 1 - q_a - q_{CO} - q_{Asche} - q_s \quad \text{Gl 4-36}$$

³⁶ In Gl 4-36 wird die Enthalpie, welche durch den Brennstoff mit der Temperatur t_B eingebracht wird, nicht berücksichtigt. Dies gilt auch für die Enthalpie der auf die Brennstoffmenge bezogenen Verbrennungsluft.

Für den physikalisch optimalen Verbrennungsprozess gelten folgende Randbedingungen:

- Die Zusammensetzung des Brennstoff-Luft-Gemisches ist stöchiometrisch. Das bedeutet, es wird nur die Mindest-Verbrennungsluftmenge l_{\min} mit den Brennstoffbestandteilen (zum Beispiel o: Sauerstoff, c: Kohlenstoff und h: Wasserstoff) der Brennkammer zugeführt. Die Luftzahl λ (vgl. beispielsweise [9]) ist in diesem Fall gleich eins.

$$\lambda_{\text{PhO}} = \frac{l_{\text{PhO}}}{l_{\min}} = \frac{l_{\min}}{l_{\min}} = 1$$

GI 4-37

- Die Verbrennung ist vollständig. Das bedeutet, die chemische Umwandlung von beispielsweise Sauerstoff mit Kohlenstoff zu Kohlendioxid CO_2 ist vollständig. Es gibt keine bleibenden Zwischenprodukte wie Kohlenmonoxid CO . Die Verluste durch Unverbranntes im Abgas q_{CO} sind gleich null. Der Verlust durch Unverbranntes in der Asche q_{Asche} ist ebenfalls gleich null.
- Die Brennkammer ist zur Umgebung als adiabat zu betrachten.

Der physikalisch optimale Wärmeübertrager in Anlehnung an Kapitel 4.5.2 wie folgt beschrieben:

- Der Wärmeübertrager ist zur Umgebung adiabat
- Die Wärmeübertragung zwischen Verbrennungsgas und Wärmeträger ist ideal. Die minimale Temperaturdifferenz ist gleich null ($\Delta T_{\min, \text{PhO}} = 0$). Daraus folgt, dass die Rücklauftemperatur des Wärmeträgers t_r gleich der Rauchgastemperatur t_{rg} ist ($t_r = t_{\text{rg}}$).

Basierend auf dem Blockschaltbild des Wärmeübertragers aus Abbildung 4-15 zeigt Abbildung 4-16 die Temperaturverläufe für den Realfall und den physikalischen Optimalfall.

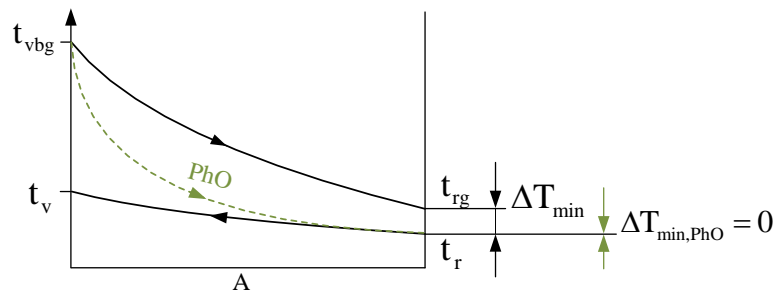


Abbildung 4-16: Temperaturverlauf im Wärmeübertrager des Wärmeerzeugers

Dadurch, dass sowohl die Brennkammer als auch der Wärmeübertrager als adiabat definiert wurden, ist der Wärmeverlust des Wärmeerzeugers an dessen Oberfläche q_s gleich null.

Der Wirkungsgrad des physikalisch optimalen Wärmeerzeugers berechnet sich somit durch den Feuerungstechnischen Wirkungsgrad bei einer Luftzahl von $\lambda = 1$ und ist damit allein von der Rauchgastemperatur abhängig: $\eta_{\text{PhO,WE}} = f(t_{\text{rg}})$.

$$\eta_{\text{PhO,WE}} = \eta_{f,\lambda=1} = 1 - q_{a,\lambda=1} = \frac{Q_N}{Q_{B,\text{PhO}}}$$

GI 4-38

Abbildung 4-17³⁷ zeigt den Feuerungstechnischen Wirkungsgrad³⁸ bezogen auf den Brennwert H_s in Abhängigkeit von der Luftzahl λ und der Rauchgastemperatur t_{rg} . Je niedriger die Luftzahl und je niedriger die Rauchgastemperatur, desto höher ist der Feuerungstechnische Wirkungsgrad. Das Physikalische Optimum ist bei $\lambda = 1$ eingezeichnet. Der Wirkungsgrad steigt bei Erreichen der Taupunkttemperatur stark an, was durch den zusätzlichen latenten Wärmegewinn durch den Kondensationsbetrieb begründet ist. Der spezifische Kondensatwassermassenstrom w_{kond} wird abgeführt.

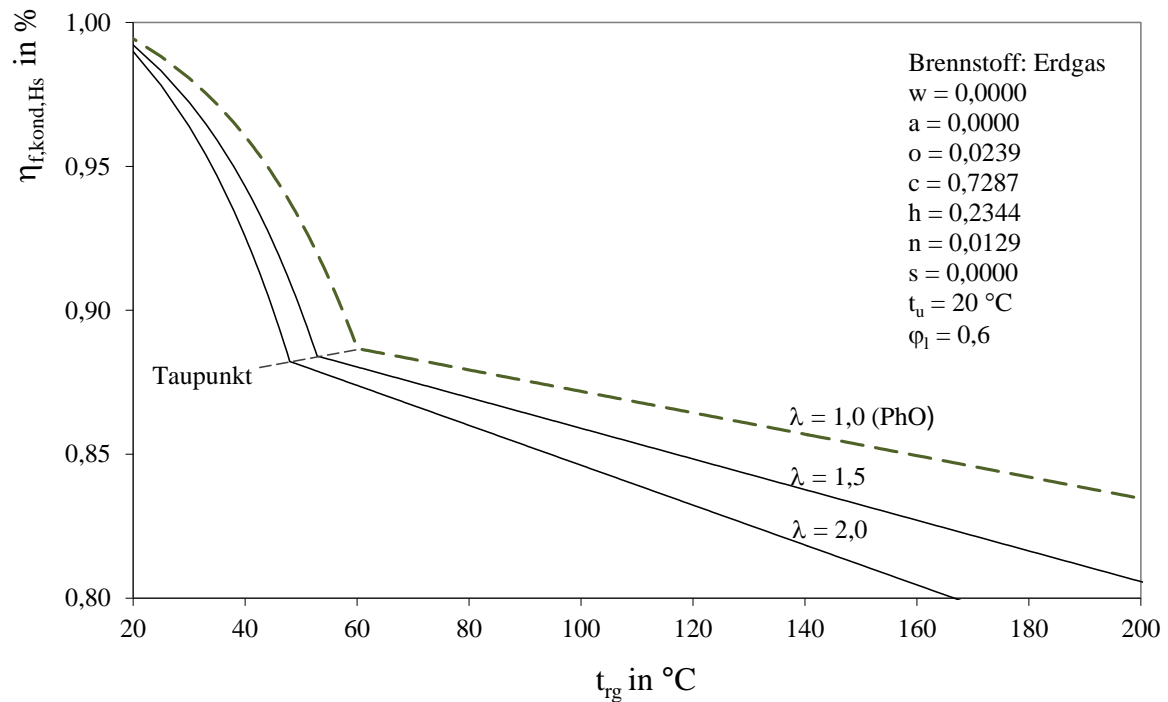


Abbildung 4-17: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad (in Anlehnung an [55], [56])

³⁷ VOLTA berechnet und zeigt in [55] den Feuerungstechnischen Wirkungsgrad einer Holzpelletverbrennung. Diese Basis wurde hier analog für den Brennstoff Erdgas benutzt.

Eine ausführliche Auswertung des Feuerungstechnischen Wirkungsgrades bei Unterschreiten der Rauchgastaupunkttemperatur liefert beispielsweise VOLTA [56] in „Erprobung der Brennwerttechnik an einem Holzpelletkessel“.

³⁸ Verluste durch Unverbranntes sind in der Berechnung nicht berücksichtigt worden ($q_{CO} = 0$, $q_{Asche} = 0$).

Die Verbrennungslufttemperatur (Umgebungslufttemperatur t_u) wurde für die Berechnung mit 20°C angenommen. Dass bei einer Rauchgastemperatur von 20°C ($t_u = t_{rg}$) der Wirkungsgrad nicht gleich 100 % ist, liegt an der relativen Luftfeuchtigkeit von 60 %. Das Rauchgas verlässt den Wärmeübertrager im Kondensationsbetrieb hingegen im gesättigten Zustand ($\varphi_1 = 100\text{ %}$).

Der PhO-Faktor³⁹ für den Wärmerzeuger berechnet sich durch das Verhältnis von realer (gemessener) Brennerbelastung zur Brennerbelastung im physikalischen Optimalfall:

$$F_{\text{PhO,WE}}^{\text{WE}} = \frac{Q_{\text{B,real}}}{Q_{\text{B,PhO}}} \quad \text{Gl 4-39}$$

Unter Verwendung von Gl 4-36 und Gl 4-38, erhält man:

$$F_{\text{PhO,WE}}^{\text{WE}} = \frac{\frac{Q_N}{\eta_k}}{\frac{Q_N}{1 - q_{a,\lambda=1}}} = \frac{1 - q_{a,\lambda=1}}{\eta_k} = \frac{1 - q_{a,\lambda=1}}{1 - q_a - q_{\text{co}} - q_{\text{Asche}} - q_s} \quad \text{Gl 4-40}$$

Eine beispielhafte Berechnung ist dem Anhang (Seite 115) zu entnehmen.

³⁹ Weitere mögliche Verluste wie Rohrleitungsverluste (z. B. zwischen Kesselhaus und Produktion), zusätzlich nötige Betriebsmittel sowie Verluste bei der Kesselwasseraufbereitung (z. B. Entgaser) wurden vernachlässigt.

4.5.6 Drucklufterzeugung

Die Druckluftversorgung kann in Produktionsfabriken für verschiedene Anwendungen erforderlich sein. Beispiele sind:

- Antreiben von Ventilarmaturen
- Ausblasen von Ausschuss
- Reinigung (möglichst reduziert)

4.5.6.1 Physikalisch optimaler Vergleichsprozess

Abbildung 4-18 zeigt einen Druckluftverdichter, welcher vom Umgebungszustand u durch die Zufuhr der spezifischen technischen Arbeit w_t die Druckluft auf den Zustand 1 verdichtet.

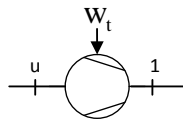


Abbildung 4-18: Blocksaltbild eines Druckluftverdichtungsprozesses

Als physikalisch optimaler Vergleichsprozess kann die isentrope Verdichtung dem realen Prozess gegenübergestellt werden.

Die spezifische technische Arbeit $w_{t,isen}$ ist gleich der mittleren spezifischen Wärmekapazität c_{pm} multipliziert mit der Temperaturdifferenz ($T_1 - T_u$):

$$w_{t,isen} = \int v dp = \int c_p dT = c_{pm} \cdot (T_1 - T_u) \quad (\text{vgl. [22]}) \quad \text{Gl 4-41}$$

Die Temperatur am Verdichterausgang T_1 kann nach [22] aus der Eintrittstemperatur T_u , dem Druckverhältnis $\frac{p_1}{p_u}$ und dem Isentropenexponenten κ berechnet werden:

$$T_1 = \left(\frac{p_1}{p_u} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot T_u \quad \text{Gl 4-42}$$

4.5.6.2 Verluste gegenüber dem physikalisch optimalen Verdichtungsprozess

Der reale Verdichtungsprozess ist verlustbehaftet und damit nicht isentrop. In [22], [31] und [50] ist ein „guter Bereich“ für den Energiebedarf (spezifische, technische Arbeit) verdichteter Luft definiert, welcher – mit der isentropen Verdichtung verglichen – in Abbildung 4-19 dargestellt⁴⁰ ist. Die Abszisse zeigt den Effektivdruck p_{eff} . Die Ordinate zeigt die spezifische (auf das Druckluftvolumen bezogen) technische Arbeit.

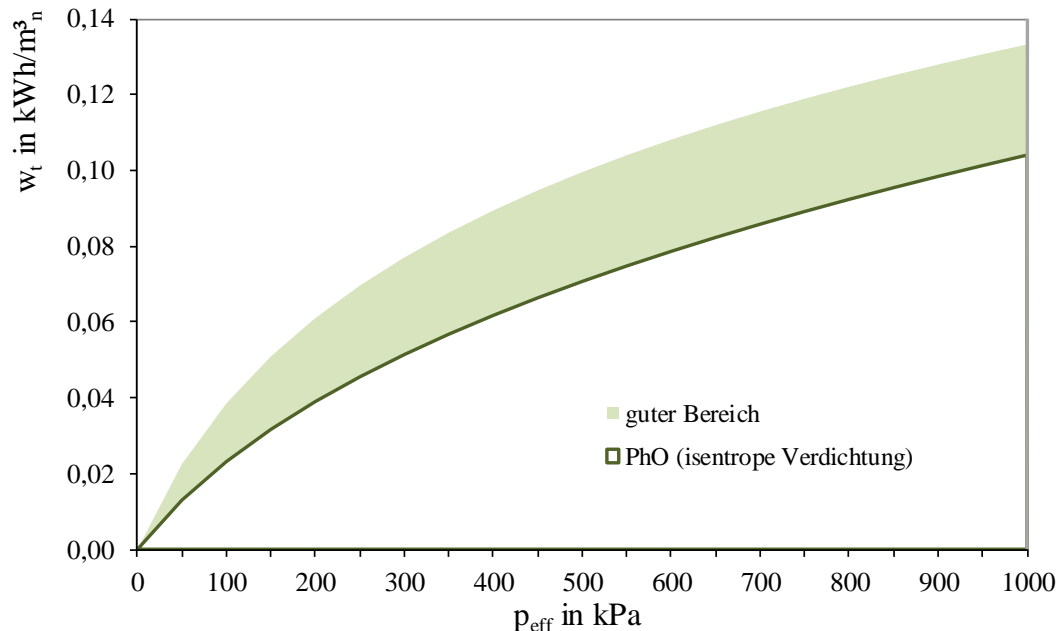


Abbildung 4-19: Physikalisch optimaler Energieverbrauch eines Verdichters (vgl. [22])

Werden weitere Verluste wie beispielsweise die anschließende Aufbereitung durch eine Drucklufttrocknungseinheit, Druckverluste durch Filterung und Rohrleitungstransport vernachlässigt, errechnet sich der PhO-Faktor wie folgt:

$$F_{\text{PhO,DL}}^{\text{DL}} = \frac{w_{\text{gemessen}}}{w_{\text{t,isen}}} \quad \text{Gl 4-43}$$

Eine beispielhafte Berechnung ist dem Anhang (Seite 116) zu entnehmen.

⁴⁰ Für die Berechnung wurde die spezifische Wärmekapazität c_p und der Isentropenexponent κ als konstant angesetzt. Die Ansaugtemperatur des Verdichtungsprozesses T_u wird mit 293 K angenommen. Nach [9] werden die Stoffwerte für trockene Luft bei 0 °C verwendet: $c_p = 1,0043 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ und $\kappa = 1,401$

Um die spezifische, technische Arbeit volumenbezogen darzustellen, muss das Ergebnis mit der Massendichte multipliziert werden. Die Massendichte der Luft wurde mit $\rho_{l,n} 1,2929 \text{ kg}/\text{m}^3_n$ [9] als konstant angenommen.

4.5.7 Rückkühlwerk

Das Rückkühlwerk verdunstet Wasser, um durch die Verdunstungsenthalpie Kaltwasser bereitzustellen. Damit das nachgespeiste Wasser (n) durch die Verdunstung (v) nicht zu stark durch Härtebildner wie Calciumionen Ca^{2+} und Magnesiumionen Mg^{2+} eindickt, wird ein Teil der nachgespeisten Menge abgeschlämmt (a).

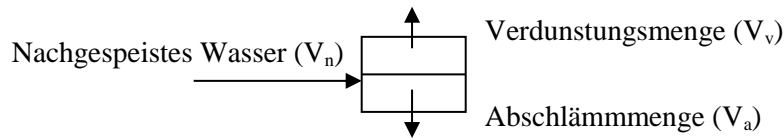


Abbildung 4-20: Blocksaltbild eines Verdunstungssystems

$$V_n = V_v + V_a \quad \text{Gl 4-44}$$

Die Eindickung des Wassers, welches dem Rückkühlwerk zugeführt wird, berechnet sich als Quotient aus nachgespeister Wassermenge und Abschlämmlmenge. Ermittelt werden kann die Eindickung auch durch die Messung der elektrischen Leitfähigkeit LF der Abschlämmlung des Rückkühlwerkes und der elektrischen Leitfähigkeit des nachgespeisten Wassers. (Vgl. beispielsweise [44].)

$$E = \frac{V_n}{V_a} = \frac{V_v + V_a}{V_a} = 1 + \frac{V_v}{V_a} = \frac{LF_a}{LF_n} \quad \text{Gl 4-45}$$

Abbildung 4-21 zeigt die nachgespeiste Wassermenge

$$V_n = V_v \cdot \frac{E}{E - 1} \quad \text{Gl 4-46}$$

in Abhängigkeit von der Eindickungszahl. Physikalisch optimal wäre, die nachgespeiste Wassermenge vollständig zu verdunsten, ohne Abschlämmen zu müssen. Die Eindickungszahl geht in diesem Zustand gegen unendlich. Zwei typische Betriebsbereiche sind markiert.

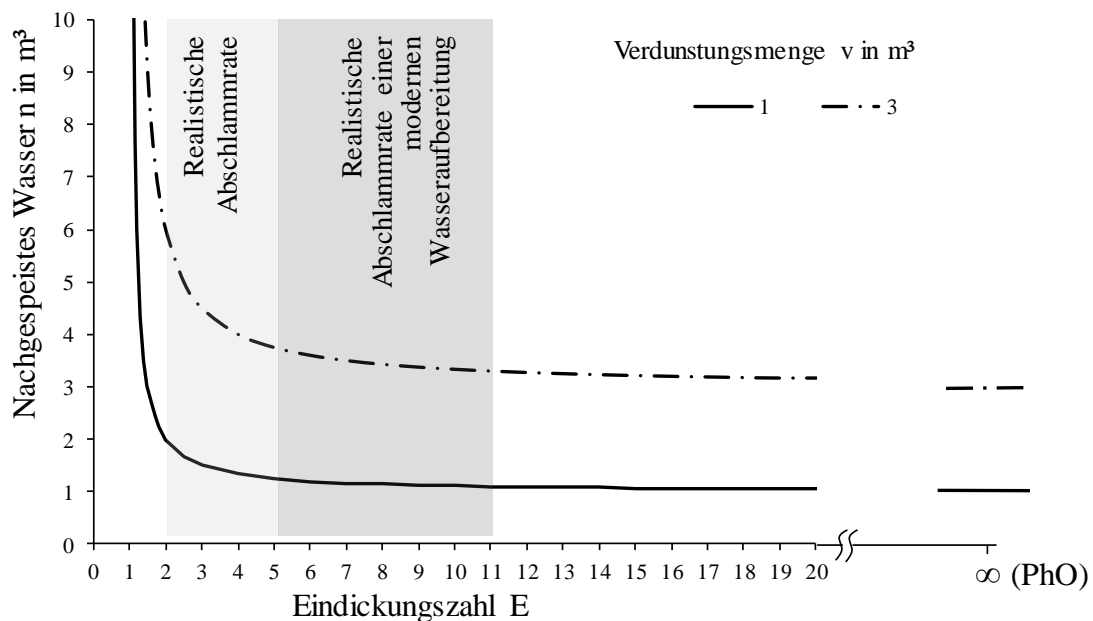


Abbildung 4-21: Nachgespeiste Wassermenge ($n = f(v, E)$) (modifiziert nach [44])

5 Systematiken

Die übergeordnete Systematik in Abbildung 5-1 zeigt den Bestandsprozess und parallel dazu das Physikalische Optimum. Es soll der ursächlich erforderliche Aufwand, zum Beispiel anhand einer Funktionsstruktur, ermittelt werden, um daraus das Physikalische Optimum zu generieren. In der Praxis wird erfahrungsgemäß meist anders herum vorgegangen, indem ein Bestandsprozess gedanklich optimiert und dabei häufig der Fokus auf die ursächlich erforderliche Funktion vernachlässigt wird.

Zur Realisierung eines Produktionsprozesses sind häufig verschiedene Verfahren möglich. Jedes Verfahren weist sein eigenes Physikalisches Optimum auf. Die Systematik kann für die Entscheidungsfindung hinsichtlich des Baus einer neuen Fabrik, einer Linie oder eines Prozesses herangezogen werden.

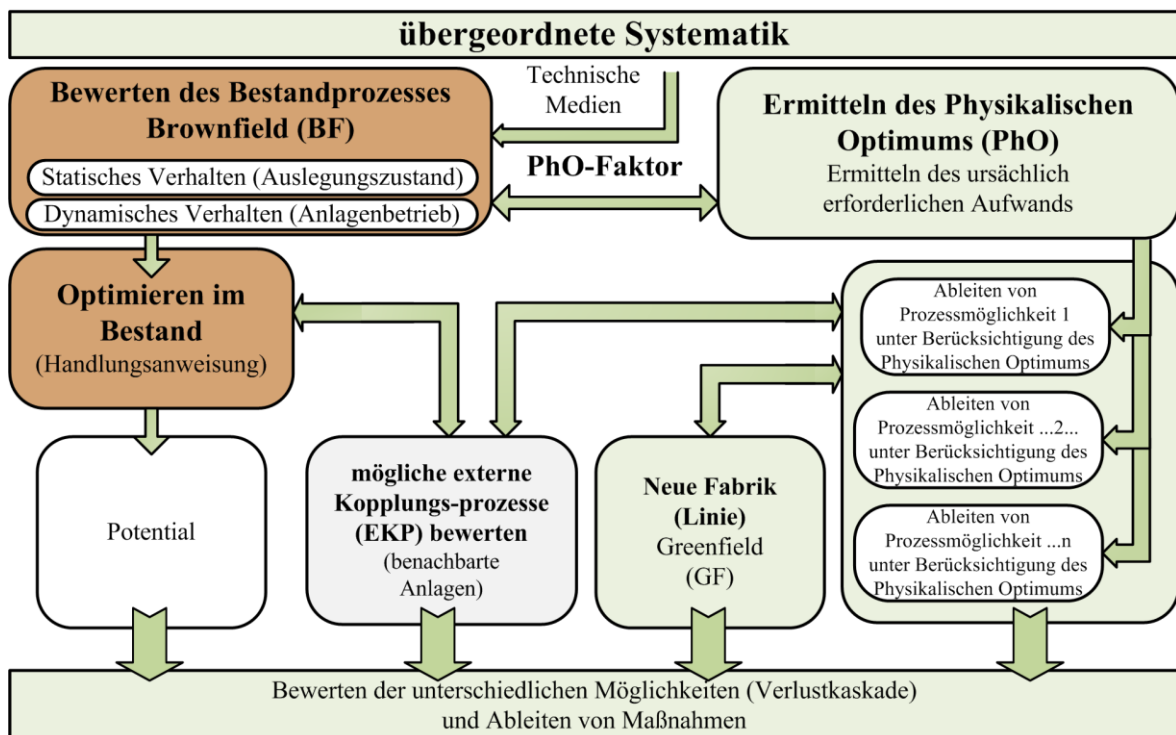


Abbildung 5-1: Übergeordnete Systematik

Prozesse können das Potential für externe Kopplungsprozesse EKP bergen, welche in dieser Arbeit beschrieben werden.

Anhand der Systematik kann ein Bestandsprozess im Hinblick auf das Physikalische Optimum optimiert werden. Bereits in der Planungsphase können die Umwandlungsverluste dargestellt werden. Während des Betriebes eines Prozesses ist es möglich, die dynamischen Verluste zu bewerten. Die Ergebnisse können anhand einer Verlustkaskade verdeutlicht werden. Die Handlungsmotivation, den Prozess zu optimieren, hängt vom ermittelten Potential ab.

5.1 Bestandsprozess

Die erste Phase der übergeordneten Systematik ist die Bewertung des Bestandsprozesses, sofern es einen solchen gibt.

Die Ermittlung des tatsächlichen Bedarfes des Bestandsprozesses ist interessant, um Ineffizienzen, welche oft über Jahre gewachsen sind, zu erkennen und dient als Vorstufe zur Ermittlung des Physikalischen Optimums. Zu ermitteln sind neben den erforderlichen Prozessgrößen wie Energie-, Volumen- und Massenströmen, auch die erforderlichen Zustandsgrößen, wie Temperatur- und Druckniveaus.

5.1.1 Messung oder Simulation als Grundlage der Bewertung

Messungen oder Simulationen sind die Grundlage für die Bewertung eines Prozesses. Eine einfache Messung – die nicht weniger hilfreich sein muss – beginnt mit einer Stoppuhr und einem Litermaß zur Bestimmung von Durchlaufmengen. Die Spanne reicht bis hin zur kontinuierlichen Datenaufnahme in onlinebasierten Datenbanken.

Die verschiedenen Möglichkeiten der Datenaufnahme sind Abbildung 5-2 veranschaulicht. Die kontinuierliche Dokumentation ist die komfortabelste Form, um Analysen zu betreiben⁴¹, sie ist aber auch die kostenintensivste⁴² Variante.

Für die Planung neuer Prozesse oder im Fall von Bestandsprozessen, bei denen keine ausreichend gute Messtechnik implementiert ist, bietet sich als Alternative die Simulation von Verbräuchen an.

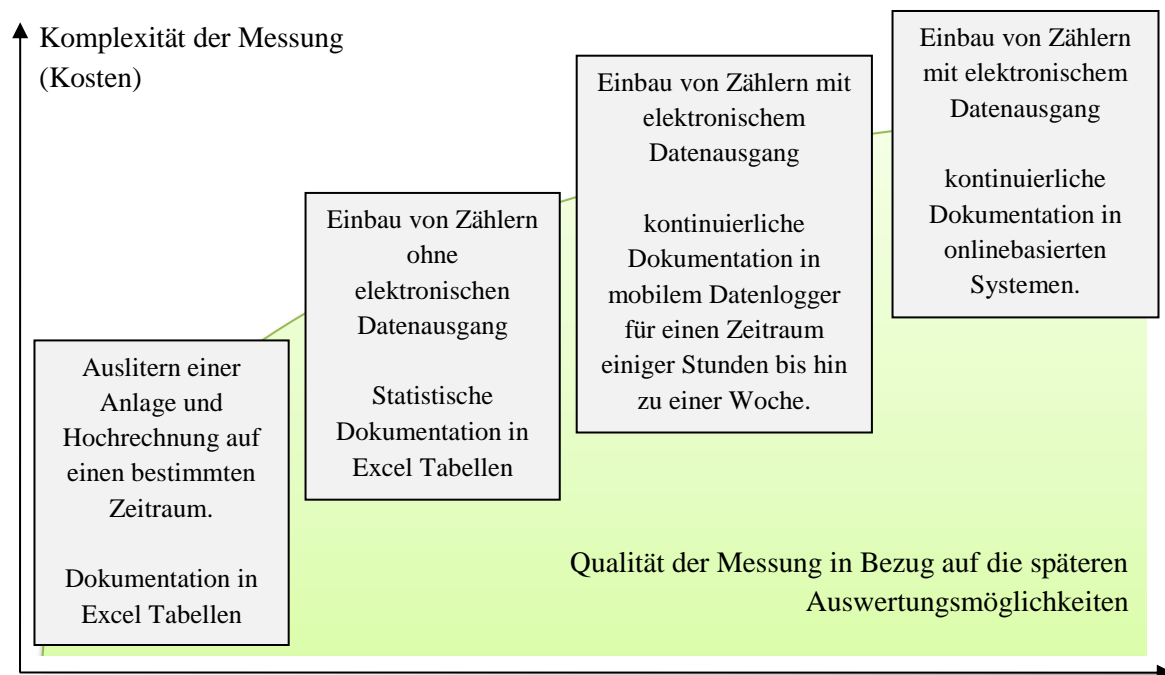


Abbildung 5-2: Möglichkeiten von Messungen (Qualität und Aufwand)

⁴¹ Abbildung 5-15 und Abbildung 5-16 zeigen eine solche Auswertung beispielhaft.

⁴² Kosten resultieren in diesem Fall aus den analogen Schnittstellen, der Einbindung in das Energiedatenmanagementsystem, der Finanzierung des Systems selbst und dessen Verwaltung.

Die Messtechnik dient einerseits der Bewertung des Bestandsprozesses im Hinblick auf die Planung eines neuen Prozesses. Andererseits ist Messtechnik erforderlich, um das Betriebsverhalten eines neuen Prozesses während der Nutzungsphase bewerten zu können. Mittels Messtechnik können Aussagen über den Energie- und Stoffeinsatz getroffen, daraus Maßnahmen abgeleitet und die Effizienz nachhaltig erhöht werden.

Abbildung 5-3 zeigt beispielhaft neben den Investitionskosten eines Prozesses x im Jahr $\tau = 1$ die Mehrinvestition für Messtechnik. Die Kosten für das Betreiben der Anlage sind für 15 Jahre kumuliert dargestellt. In diesem Beispiel sind nach 5 Jahren die Kosten für Messtechnik durch eine Optimierung des Betriebsverhaltens refinanziert. In der Wirtschaftswissenschaft ist dieser Wert als Pay-back-Periode PBP⁴³ (vgl. beispielsweise [55]) bekannt.

Jedes Betriebsjahr darüber hinaus steigert die Einsparungen durch die Nutzung der Messtechnik. Nach 15 Jahren Betrieb (Ende des Lebenszyklus des Prozesses) lassen sich die Gesamteinsparungen ablesen.

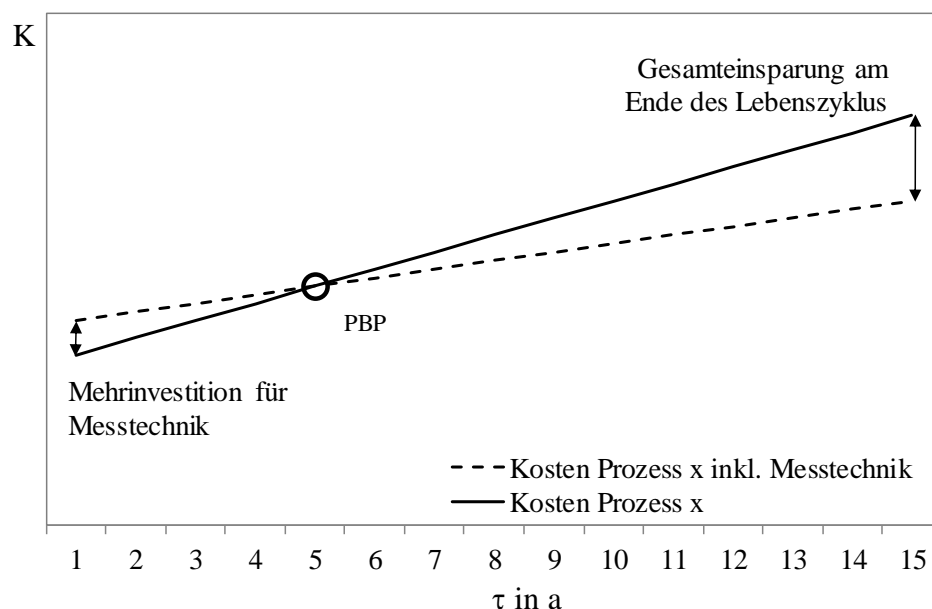


Abbildung 5-3: Rechtfertigung der Mehrkosten für Messtechnik

Analog kann die Mehrinvestition für einen effizienteren Prozess dargestellt werden. Der effizientere Prozess finanziert sich ebenfalls durch einen geringeren Verbrauch während der Anlagennutzung selbst.

⁴³ Zur Vereinfachung liegt der Darstellung eine statische Betrachtung zugrunde. Das bedeutet, dass die Verzinsung des Kapitals sowie die Inflationsrate vernachlässigt wurden.

5.1.2 Erweiterte Pareto-Analyse

Das 80/20-Prinzip⁴⁴ stellt eine Unausgewogenheit zwischen Ursachen und Wirkungen, Aufwand und Ertrag, Anstrengung und Ergebnis dar. Eine typische Verteilung ist, dass 80 % des Ertrags von 20 % des Aufwands begründet sind, 80 % der Wirkungen durch 20 % der Ursachen bedingt sind und 80 % der Ergebnisse auf 20 % der Anstrengungen zurückgehen. [34]

Auf Energie- und Stoffverbräuche bezogen würde das bedeuten, dass wenige große Verbraucher den Großteil des Gesamtverbrauches verursachen.

Die 80/20-Regel ist ein praktisches Vorgehen, welches die wesentlichen Verbraucher priorisiert, um unter Ausschluss unwesentlicher Verbraucher schneller zu einem brauchbaren Ergebnis zu gelangen. Auch für die Validierung in dieser Arbeit können nicht 100 % der Verbraucher messtechnisch erfasst werden.

Die Pareto-Analyse wird in dieser Arbeit um zwei Bestandteile erweitert (siehe Abbildung 5-4).

Einerseits kann durch die Verwendung eines Gesamtzählers eine Bilanzdifferenz dargestellt werden. Die Bilanzdifferenz zeigt die Summe aller nicht direkt erfassten Verbraucher auf. In dieser Menge sind auch Prozesse enthalten, die möglicherweise noch Optimierungspotential aufweisen, jedoch unbekannt sind. Die Größe der Bilanzdifferenz ist ein Maß für die Notwendigkeit, weitere Messtechnik zu installieren. Insbesondere für neue Prozesse sollte die rechtzeitige Installation bedacht werden.

Darüber hinaus wird zwischen physikalisch minimalen Bedarf (dem Physikalischen Optimum PhO) und den Verlusten differenziert. Bei den Verlusten werden wiederum Verluste, welche durch den realen Umwandlungsprozess (vom Stand der Technik SdT abhängig) verursacht werden, und dynamische Verluste Dyn unterschieden. Bereits durch Optimierungen Opt realisierte Einsparungen werden ebenfalls dargestellt.

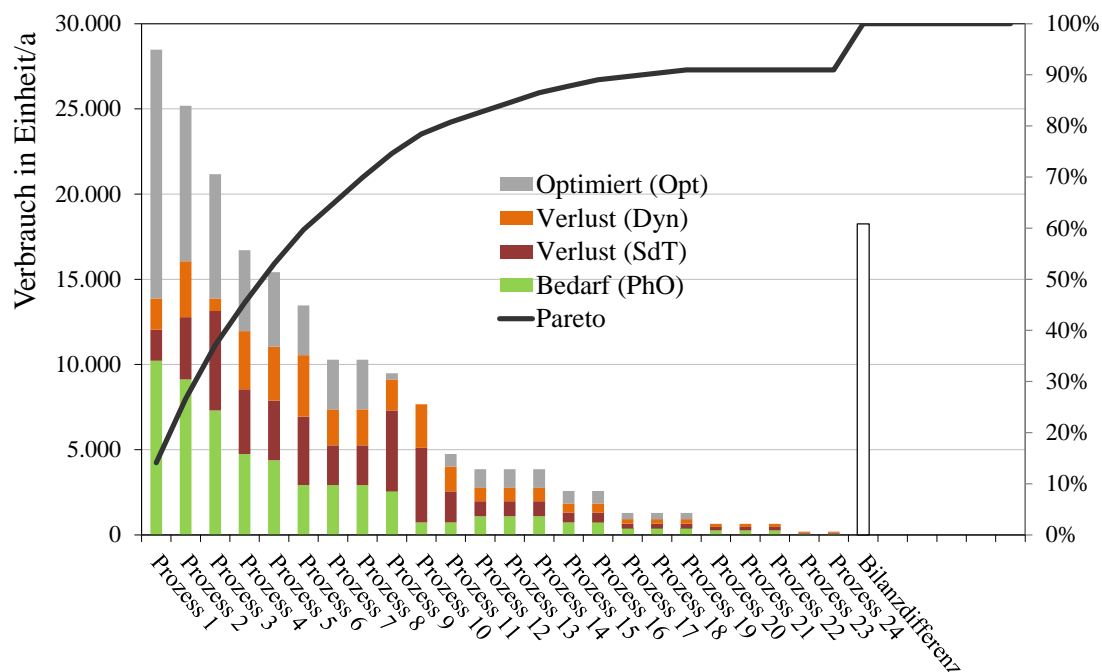


Abbildung 5-4: Erweiterte Pareto-Analyse (fiktives Beispiel)

⁴⁴ Die dem 80/20-Prinzip zugrunde liegende Verteilung wurde 1897, von dem italienischen Ökonomen Vilfredo Pareto (1848–1923) entdeckt und wird daher auch als Pareto-Analyse bezeichnet [34].

Durch diese Erweiterungen wird ersichtlich, dass kleinere Verbraucher größere Potentiale haben können als große Verbraucher. Abbildung 5-4 zeigt exemplarisch, dass Prozess 9 und 10 wegen des Verlustanteils ein größeres Optimierungspotential bergen als Prozess 1. Nach der einfachen Pareto-Analyse (nicht differenziert) würde der Fokus zunächst auf Prozess 1 liegen, da dieser den größten Verbrauch verursacht.

5.2 Potentialanalyse

Der PhO-Faktor bestimmt neben dem Verbrauch die Priorität, einen ineffizienten Prozess zu optimieren. Je größer der PhO-Faktor und je höher der Verbrauch V , desto größer ist das Potential, durch eine Optimierung das Gesamtergebnis zu verbessern. Wenn das Potential als Produkt von PhO-Faktor und Verbrauch definiert wird,

$$\text{Potential} = V \cdot F_{\text{PhO}}$$

Gl 5-1

können Graphen konstanten Potentials abgebildet werden. Ein Prozess mit geringem PhO-Faktor und hohem Verbrauch kann somit ein ebenso großes Potential darstellen wie ein Prozess mit hohem PhO-Faktor und geringem Verbrauch. Abbildung 5-5 zeigt den Verbrauch V und den PhO-Faktor sowie das daraus resultierende Potential.

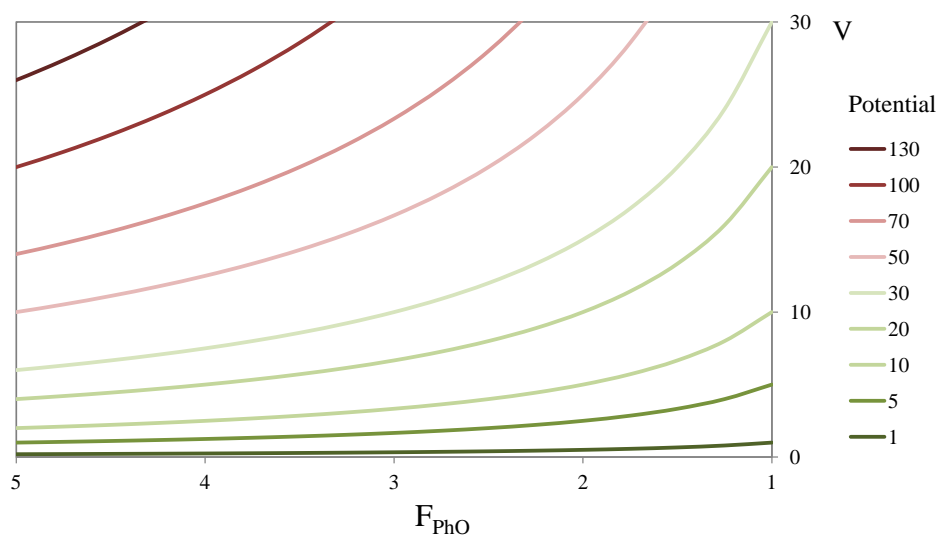


Abbildung 5-5: Physikalisches Optimum und absoluter Verbrauch

Der Verbrauch ist im Kontext der Potentialanalyse als allgemein aufzufassen. Gl 5-1 kann somit für jede Position innerhalb der Verlustkaskade angewendet werden.

Das Potential für einen Prozess kann auch durch die Blasengröße (Fläche) ausgedrückt werden. Abbildung 5-6 stellt beispielhaft die Technischen Medien in Abhängigkeit von PhO-Faktor und Verbrauch⁴⁵ einander gegenüber. Der Verbrauch der einzelnen Prozesse wurde zur Vereinheitlichung auf den Primärenergieverbrauch zurückgerechnet. Je größer der PhO-Faktor und je höher der Verbrauch, desto größer ist die Blasengröße des Prozesses. Es wird ersichtlich, dass in diesem Beispiel die Wärmeerzeugung – obwohl diese näher am Physikalischen Optimum liegt – ein größeres Potential birgt als die „Druckluft“. Der Grund hierfür liegt im höheren Verbrauch für die Wärmeerzeugung.

Der theoretische Verbrauch des Physikalischen Optimums kann mittels des PhO-Faktors aus dem Verbrauch des Bestandsprozesses berechnet werden:

$$V_{\text{PhO}} = \frac{V}{F_{\text{PhO}}}$$

GI 5-2

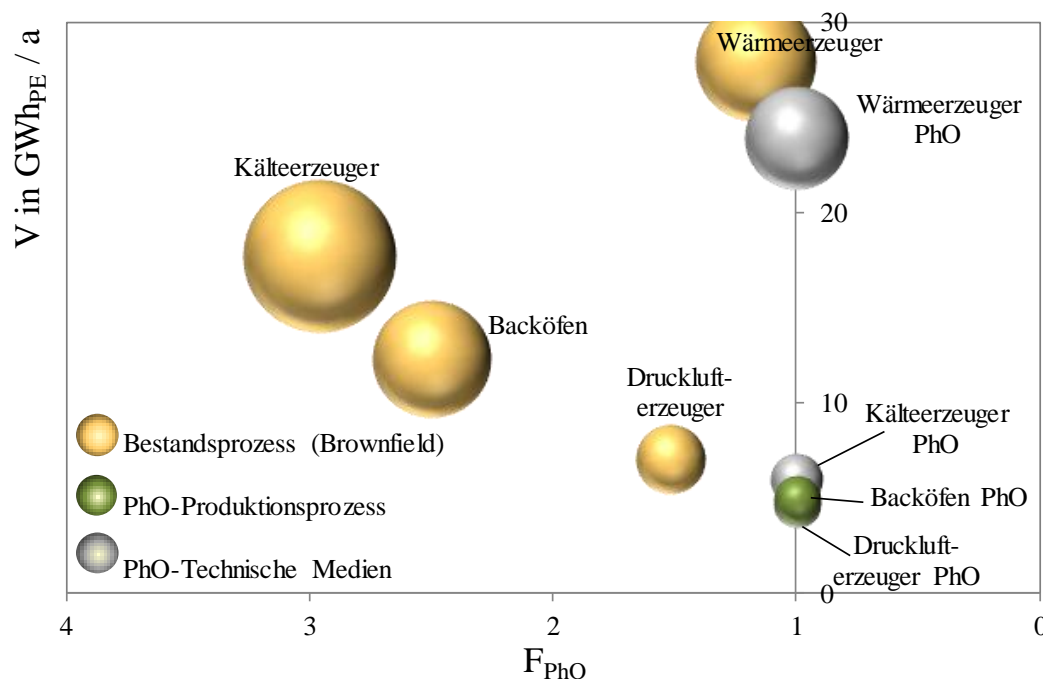


Abbildung 5-6: Priorisieren nach Physikalischen Optima und Verbräuchen

Die Bestandsprozesse (Brownfield-Prozesse) werden in Abbildung 5-6 gelb-braun dargestellt. Der Backofenprozess wird im physikalischen Optimalfall – PhO-Faktor 1 – in grün dargestellt.

Die technischen Medien sind auf ihr Physikalisches Optimum untersucht worden und werden bei einem PhO-Faktor von 1 in grau dargestellt, um sie hervorzuheben. Bei einer weiteren Betrachtung des Gesamtprozesses (zum Beispiel der gesamten Fabrik), unter Berücksichtigung der nachgeschalteten Umwandlungsprozesse innerhalb der Produktion, kann der Verbrauch der technischen Medien niedriger liegen.

⁴⁵ Der Verbrauch wurde anhand realer Prozesse in einer Fabrik überschlägig ermittelt und der PhO-Faktor daraus bestimmt. Für das Beispiel der Technischen Medien gilt der Faktor $F_{\text{PhO, TM}}^{\text{TM}}$. Der Verbrauch entspricht dem Jahresprimärenergieverbrauch. Dynamische Betriebsbedingungen wurden vernachlässigt.

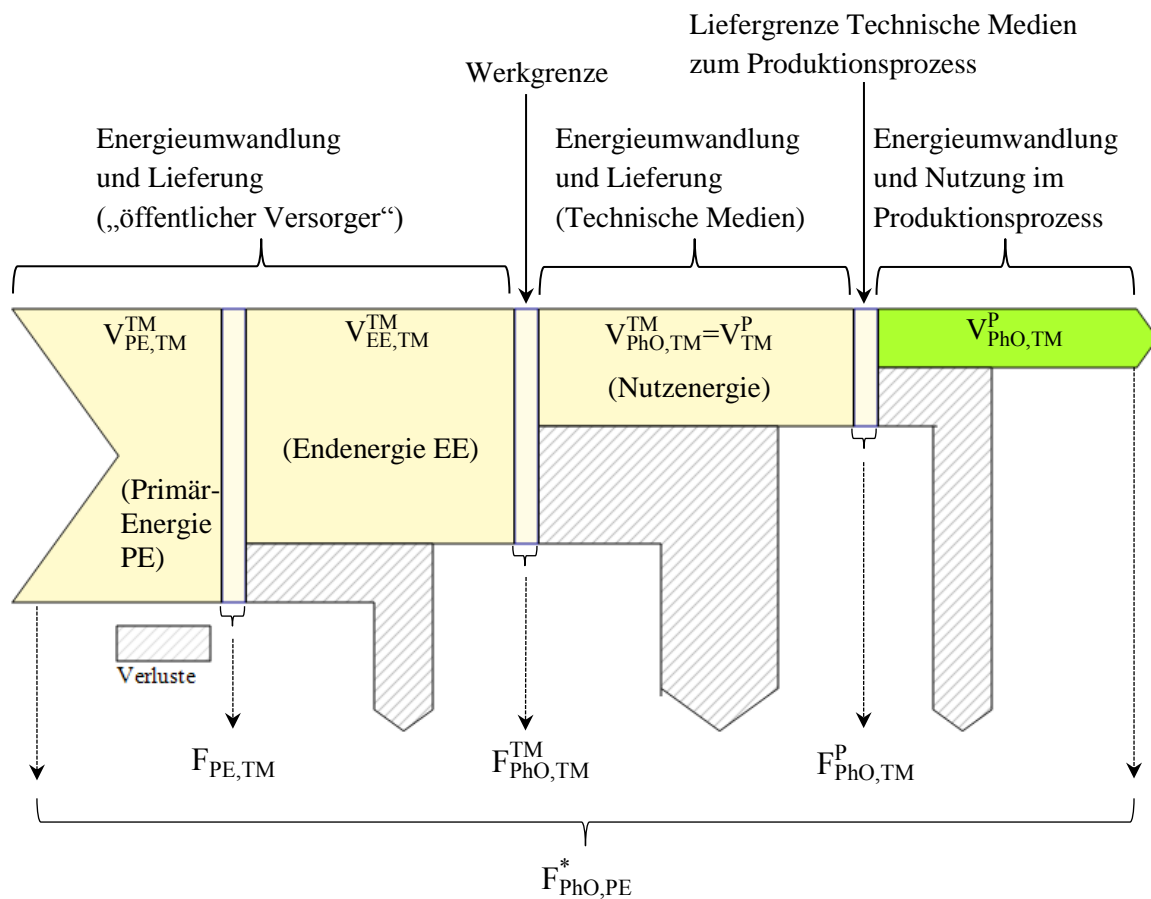
5.3 Bilanzierung unterschiedlicher Energieformen

Der Verbrauch eines Produktionsprozesses ist sowohl durch den Prozess selbst als auch durch den Einsatz der technischen Medien bedingt, welche diesen versorgen. In Produktionsprozessen werden häufig mehrere Technische Medien TM verwendet. Eine Möglichkeit, um die verschiedenen technischen Medien mit einem einheitlichen Maßstab bewerten zu können, ist die primärenergetische Bewertung (vgl. Kapitel 3.2).

Abbildung 5-7 zeigt die Verlustkaskade eines TM im Produktionsprozess, ausgehend von dem ursprünglichen TM des „öffentlichen Versorgers“⁴⁶. Die gelieferte Endenergie wird innerhalb eines Produktionswerkes in Nutzenergiearten wie „Kälte“, „Druckluft“, „Wärme“ usw. umgewandelt. Im letzten Schritt wird gezeigt, welcher Anteil der Nutzenergie im physikalischen Optimalfall zur Herstellung eines Produktes benötigt wird.

Dieser Schritt ist eine Erweiterung zu der in der Literatur bislang bekannten Darstellung der Verlustkaskade (vgl. Kapitel 3.2). Der physikalisch optimale Verbrauch ist der Teil der Nutzenergie, welcher unter physikalisch optimalen Bedingungen erforderlich ist. Der übrig bleibende Anteil der Nutzenergie ist jener Anteil, welcher nach den Randbedingungen der Physik als Verlust zu betrachten ist.

⁴⁶ Der Primärenergiefaktor (Energieumwandlung sowie Transport) ist nicht unter physikalisch optimalen Bedingungen berechnet worden. Dieser Umstand wird in dieser Arbeit vernachlässigt, so dass der Primärenergiefaktor nach Tabelle 3-2 Anwendung finden kann.



- $V_{PhO, TM}^P$: physikalisch optimaler Verbrauch im Produktionsprozess eines Technisches Mediums
- V_{TM}^P : realer Verbrauch im Produktionsprozess eines Technisches Mediums
- $V_{PhO, TM}^{TM}$: physikalisch optimaler Endenergiebezug eines Technisches Mediums
- $V_{EE, TM}^{TM}$: realer Endenergieverbrauch eines Technischen Mediums
- $V_{PE, TM}^{TM}$: realer Primärenergieverbrauch eines Technischen Mediums
- $F_{PE, TM}$: Primärenergiefaktor für ein technisches Medium
- $F_{PhO, TM}^{TM}$: PhO-Faktor für die Bewertung der Technischen Medien (Medienversorgungsprozess)
- $F_{PhO, TM}^P$: PhO-Faktor für die Bewertung der Technischen Medien im Produktionsprozess
- $F_{PhO, PE}^*$: Verlustfaktor des Gesamtprozesses (von der Primärenergie bis zum PhO im Produktionsprozess)

Abbildung 5-7: Erweiterte Verlustkaskade eines Technischen Mediums

5.3.1 Berechnung

Bei konkreten Berechnungen ist darauf zu achten, dass für die Verbräuche des Produktionsprozesses ($V_{\text{PhO, TM}}^{\text{P}}$ sowie V_{TM}^{P}) eine äquivalente Einheit verwendet wird.

So würde die Kälteenergie Q_0 statt in kWh_K in die elektrische Arbeit unter physikalisch optimalen Bedingungen in $\text{kWh}_{\text{el, K}}$ umgerechnet werden (vgl. Kapitel 4.5.4). Und der Druckluftverbrauch würde statt in $\text{m}^3_{\text{n, DL}}$ in $\text{kWh}_{\text{el, DL}}$ umgerechnet werden (vgl. Kapitel 4.5.6).

Innerhalb einer Fabrik wird die Energie durch die Versorgung mit Technischen Medien umgewandelt. Es wird der PhO-Faktor für die Bewertung der Technischen Medien definiert. Der PhO-Faktor wird für jedes Technische Medium separat bewertet.

$$F_{\text{PhO, TM}}^{\text{TM}} = \frac{V_{\text{EE, TM}}^{\text{TM}}}{V_{\text{PhO, TM}}^{\text{TM}}} = \frac{V_{\text{EE, TM}}^{\text{TM}}}{V_{\text{TM}}^{\text{P}}} \quad \text{Gl 5-3}$$

Der Produktionsprozess nutzt die Technischen Medien für die Herstellung von Produkten. Auch dieser Prozess ist verlustbehaftet, so dass ein PhO-Faktor für den Produktionsprozess definiert wird.

$$F_{\text{PhO, TM}}^{\text{P}} = \frac{V_{\text{TM}}^{\text{P}}}{V_{\text{PhO, TM}}^{\text{P}}} \quad \text{Gl 5-4}$$

Der PhO-Faktor kann auf Basis einer primärenergetischen Bewertung allgemeingültig formuliert werden. Der Faktor bewertet den Verlustanteil, welcher von einer Fabrik beeinflussbar ist.

$$F_{\text{PhO, PE}} = \frac{V_{\text{PE}}}{V_{\text{PhO, PE}}} \quad \text{Gl 5-5}$$

Für eine Gesamtbetrachtung unter Berücksichtigung aller Technischen Medien gilt:

$$V_{\text{PE}} = \sum_{\text{TM}} (V_{\text{PE, TM}}^{\text{TM}}) = \sum_{\text{TM}} (V_{\text{PhO, TM}}^{\text{P}} \cdot F_{\text{PhO, TM}}^{\text{P}} \cdot F_{\text{PhO, TM}}^{\text{TM}} \cdot F_{\text{PE, TM}}) \quad \text{Gl 5-6}$$

und

$$V_{\text{PhO, PE}} = \sum_{\text{TM}} (V_{\text{PhO, TM}}^{\text{P}} \cdot F_{\text{PE, TM}}) \quad \text{Gl 5-7}$$

Soll der Verlust durch die Primärenergieumwandlung in die Bewertung einbezogen werden, ist die Basis der physikalische Optimalverbrauch ohne den primärenergetischen Bezug. Dieser Faktor berücksichtigt vom Primärenergieverbrauch bis zum physikalisch optimalen Anteil der Nutzenergie alle Verluste der Verlustkaskade aus Abbildung 5-7.

$$F_{\text{PhO, PE}}^* = \frac{V_{\text{PE}}}{V_{\text{PhO}}} \quad \text{Gl 5-8}$$

und

$$V_{\text{PhO}} = \sum_{\text{TM}} (V_{\text{PhO, TM}}^{\text{P}}) \quad \text{Gl 5-9}$$

5.3.2 Systematik

Um mehrere Energieformen rechnerisch für die Gesamtbilanz verarbeiten zu können, gelten folgende Voraussetzungen:

- Es wird gegen die Richtung der Verlustkaskade (vgl. Abbildung 5-7) „rückwärts“ gerechnet.
- Es sind äquivalente Einheiten zu verwenden, um eine Einheitsbasis zu schaffen.
- Es werden mehrere Energien zunächst separat bewertet und anschließend aufsummiert.

Die Systematik zur primärenergetischen Bewertung eines Produktionsprozesses wird in Abbildung 5-8 erläutert. Die Schritte 1 bis 6 werden für jedes Technische Medium im Produktionsprozess durchgeführt und schließlich in Schritt 7 zusammengefasst.

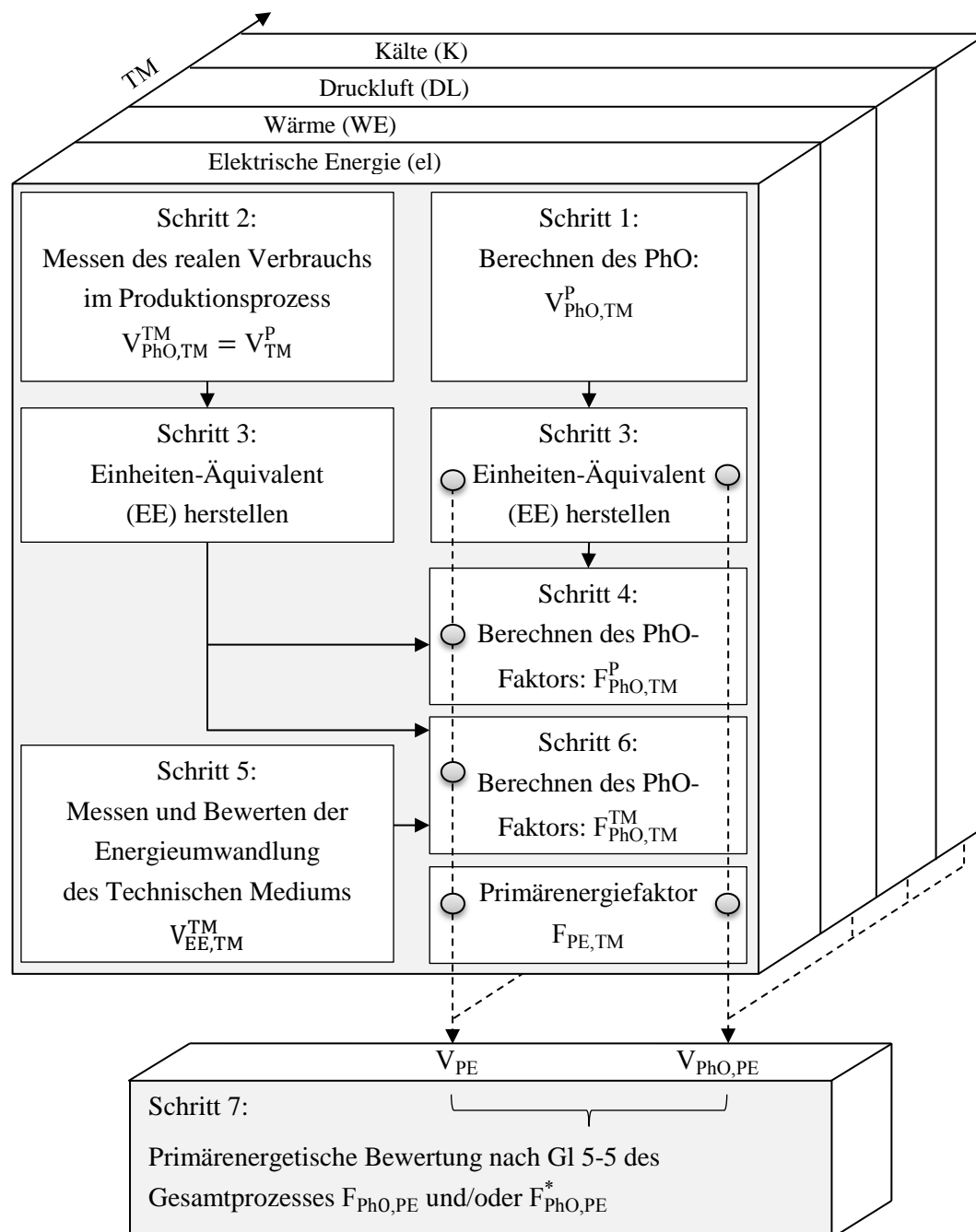


Abbildung 5-8: Systematik zur primärenergetischen Bewertung eines Produktionsprozesses

5.3.3 Verlustfaktoren und Ableitung der Optimierungsstrategie

Tabelle 5-1 zeigt beispielhaft die Verlustfaktoren der Technischen Medien Kälte, Druckluft, Wärme und der elektrischen Energie zur Berechnung des Primärenergiebedarfes auf Basis der Physikalischen Optima.

Das Einheitenäquivalent liefert die Bezugseinheit auf Basis der endenergetischen Bewertung und ermöglicht somit eine weiterführende Berechnung bis hin zum Primärenergieverbrauch. Das Einheitenäquivalent wird für den Wärmeerzeuger zur Vereinfachung erst in einem späteren Schritt auf die Endenergie (kWh_B) umgerechnet.

Tabelle 5-1: Verlustfaktoren der Technischen Medien

Technisches Medium TM	Kälte (KE) nach Kap. 4.5.4	Druckluft (DL) nach Kap. 4.5.6	Wärme (WE) nach Kap. 4.5.5	Elektrische Energie (el)
$V_{\text{PhO,TM}}^{\text{P}}$	Q_0 in kWh _{th,K}	V_{DL} in m _n ³	Q_{th} in kWh _{th,WE}	W_{el} in kWh _{el}
Äquivalent	$\ddot{A}q_K = \frac{1}{\varepsilon_{\text{KC}}}$ $= \frac{1}{10,23} \frac{\text{kWh}_{\text{el,K}}}{\text{kWh}_{\text{th,K}}}$	$\ddot{A}q_{\text{DL}}$ $= 0,0822 \frac{\text{kWh}_{\text{el,DL}}}{\text{m}_n^3}$	$\ddot{A}q_{\text{WE}}$ $= 1 \frac{\text{kWh}_{\text{th,WE}}}{\text{kWh}_{\text{th,WE}}}$	$\ddot{A}q_{\text{el}}$ $= 1 \frac{\text{kWh}_{\text{el}}}{\text{kWh}_{\text{el}}}$
$F_{\text{PhO,TM}}^{\text{TM}}$	$3,77 \frac{\text{kWh}_{\text{el,K}}}{\text{kWh}_{\text{el,K}}}$	$1,52 \frac{\text{kWh}_{\text{el,DL}}}{\text{kWh}_{\text{el,DL}}}$	$1,17 \frac{\text{kWh}_B}{\text{kWh}_B}$	$1 \frac{\text{kWh}_{\text{el}}}{\text{kWh}_{\text{el}}}$
$F_{\text{PE,TM}}$ (vgl. Tabelle 3-2)	$2,96 \frac{\text{kWh}_{\text{PE}}}{\text{kWh}_{\text{EE}}}$	$2,96 \frac{\text{kWh}_{\text{PE}}}{\text{kWh}_{\text{EE}}}$	$1,12 \frac{\text{kWh}_{\text{PE}}}{\text{kWh}_{\text{EE}}}$	$2,96 \frac{\text{kWh}_{\text{PE}}}{\text{kWh}_{\text{EE}}}$

Aus Abbildung 5-7 und Tabelle 5-1 kann eine Optimierungsstrategie abgeleitet werden. Die Optimierung – einhergehend mit einer Reduktion des Gesamt-PhO-Faktors (Gl 5-8) – ist an drei Stellen möglich:

1. Verluste durch öffentliche Versorger:
Die Energieumwandlung durch den öffentlichen Versorger kann i. d. R. nicht beeinflusst werden. Denkbar sind an dieser Stelle jedoch Kopplungsprozesse wie beispielsweise die Kraft-Wärme-Kopplung, welche innerhalb eines Werkes umgesetzt werden können.
2. Energieumwandlung bei der Technischen Medienerzeugung:
An dieser Stelle kann der PhO-Faktor verkleinert werden, indem Verluste innerhalb der Technischen Medienerzeugung verringert werden.
3. Energieumwandlung innerhalb des Produktionsprozesses:
Durch die Reduktion der durch die Produktionsprozesse bedingten Verluste kann der Gesamt-PhO-Faktor ebenfalls verringert werden.

Je größer der einzelne Verlustanteil, desto größer ist das Potential, den Gesamt-PhO-Faktor zu verringern (vgl. hierzu Kapitel 5.2 Potentialanalyse).

5.4 Kopplungsprozesse

Kopplungsprozesse, insbesondere system-externe Kopplungsprozesse EKP, werden in dieser Arbeit bewusst separat betrachtet, da sie oft abhängig von weiteren Prozessen sind. Das bedeutet, dass Kopplungsprozesse häufig nur im Verbund mit anderen Prozessen realisierbar sind und das System aus sich selbst heraus diesen Optimierungsschritt nicht liefern kann.

Unter Berücksichtigung von Kopplungsprozessen ist es möglich, den Verbrauch eines Gesamtsystems auf ein Niveau unterhalb dessen zu reduzieren, welches die Summe der physikalisch-optimalen Einzelprozesse nach Abbildung 5-9 benötigen würde.

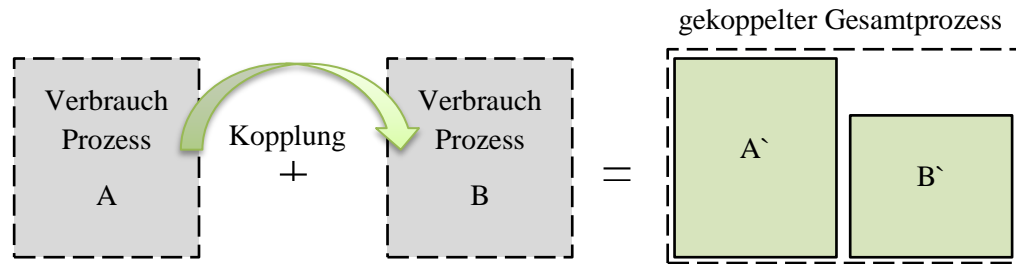


Abbildung 5-9: Prozesskopplung

Darüber hinaus beschreibt dieses Kapitel die Nutzung von Prozesskaskaden PKK.

Ein Beispiel sei eine vereinfacht dargestellte Druckluftherzeugungsanlage mit einer anschließenden Kühlung zur Einhaltung einer vorgegebenen Drucktaupunkttemperatur. Abbildung 5-10 skizziert einen Verdichter, dessen komprimierte Druckluft von Zustand $1'$ nach $2'$ heruntergekühlt wird. Dem Verdichter wird die Leistung \dot{W} zugeführt. Aus dem Verdichter wird der Wärmestrom $\dot{Q}_{u1'}$, innerhalb des Kühlers der Wärmestrom $\dot{Q}_{1'2'}$, abgeführt.

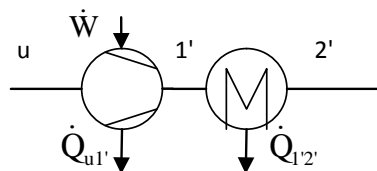


Abbildung 5-10: Einfacher Druckluftverdichtungsprozess mit anschließender Kühlung

Unter Berücksichtigung einer Prozesskaskade PKK wird überlegt, ob die heiße Druckluft auch mittels eines bezüglich der Kosten oder des Energieverbrauches günstigeren Mediums abgekühlt werden kann. In diesem Beispiel wird dem Druckluftverdichter ein Nachkühler NK nachgeschaltet, welcher mittels Rückkühlwasser, wie in Abbildung 5-11 dargestellt, die Druckluft kühlt. Der Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{RKW, NK}}$ wird abgeführt.

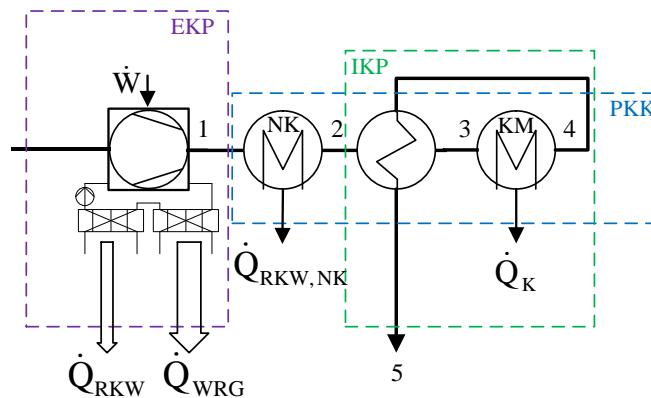


Abbildung 5-11: IKP, EKP, PKK bei der Druckluftverdichtung mit anschließender Kühlung

Der interne Kopplungsprozess IKP des Systems zeigt, wie durch die Kältemaschine die Druckluft in Schritt 3 \rightarrow 4 durch die Wärmeabfuhr \dot{Q}_K auf t_4 abgekühlt wird. Diese „kalte“ Druckluft wird für eine weitere Vorkühlung der Druckluft verwendet (Schritt 2 \rightarrow 3), um die Kältemaschine zu entlasten. Die auf eine Taupunkttemperatur abgekühlte Druckluft t_4 erwärmt sich im Gegenzug zu (Schritt 2 \rightarrow 3) auf t_5 . Die Wiedererwärmung der Druckluft ist nicht nachteilig, da die Absenkung auf t_4 nur für die Wasserdampfkondensation zur Erreichung der Drucktaupunkttemperatur erforderlich ist. Die Wiedererwärmung hat sogar den Vorteil, dass die Druckluftrohrleitungen in den anschließenden Produktionsbereichen nicht zur Kondensatbildung an der Außenwandung neigen.

Der externe Kopplungsprozess EKP dieses Beispiels zeigt die Nutzung der Abwärme aus der Druckluftherzeugung in einer externen Wärmerückgewinnung durch die Abfuhr des Wärmestromes \dot{Q}_{WRG} . Diese Nutzung kann z. B. in einer Heizungsanlage oder einer Trinkwasservorwärmung erfolgen. Wenn die Wärmerückgewinnung die abzuführende Wärmemenge nicht vollständig nutzen kann, wird über einen weiteren Kühler die Restwärmemenge \dot{Q}_{RKW} an das Rückkühlwerk abgeführt.

Bei der Untersuchung der Kopplung von Wärmeströmen – beispielsweise für eine Wärmerückgewinnung – wird häufig die „Pinch-Point-Methode“ (zum Beispiel beschrieben in [9]) angewandt. Die Methode erfasst die Wärmeströme und Temperaturniveaus der zu kühlenden und der zu erwärmenden Medien und stellt diese in einem Diagramm dar. Das Ergebnis ist eine Schnittmenge, die quantitativ zeigt, welcher Wärmestrom \dot{Q}_{WRG} durch Kopplung zurückgewonnen werden kann.

Für das Beispiel der Wärmerückgewinnung aus Druckluftverdichtungsprozessen wird in Abbildung 5-12 der Wärmestrom \dot{Q}_{WRG} gezeigt, welcher durch einen EKP zurückgewonnen werden kann. Es ist darüber hinaus der zusätzlich abzuführende Wärmestrom \dot{Q}_{RKW} ersichtlich, welcher aufzuwenden ist, um die Eintrittstemperatur des Kühlwassers in die Druckluftmaschine sicherzustellen. Üblich sind Temperaturen von 40°C. Um das Heizungswasser bereitzustellen, wird in diesem Beispiel mittels eines Nachheizers die Wärmemenge \dot{Q}_{NH} zugeführt. Übliche Vorlauftemperaturen für Heizungsnetze sind 60°C.

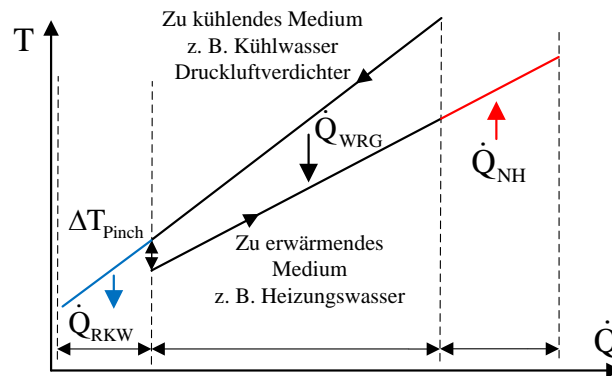


Abbildung 5-12: Pinch-Point-Methode am Beispiel einer Wärmerückgewinnung⁴⁷

Um das Kopplungspotential technischer Prozesse möglichst weitgehend auszuschöpfen, spielen Speicher eine besondere Rolle. Speicher sind eine Methode, um der Dynamik von Systemen zu begegnen. Ein Beispiel dafür sei ein Reinigungsprozess (siehe Abbildung 5-13), für den stoßartig eine große Wärmemenge benötigt wird. Demgegenüber steht eine Abwärmequelle, welche – über einen längeren Zeitraum betrachtet – die Wärmemenge liefern könnte. Eine Kopplung erfordert einen thermischen Speicher. Ohne Speicher kann bestenfalls die Wärmeleistung der Abwärmequelle zur Reduktion der Wärmeleistung des Reinigungsprozesses genutzt werden. Der Speicher hingegen kann im Optimalfall die Wärmemenge (Flächenvergleich) der Abwärmequelle speichern und bei Bedarf für den Reinigungsprozess zur Verfügung stellen.

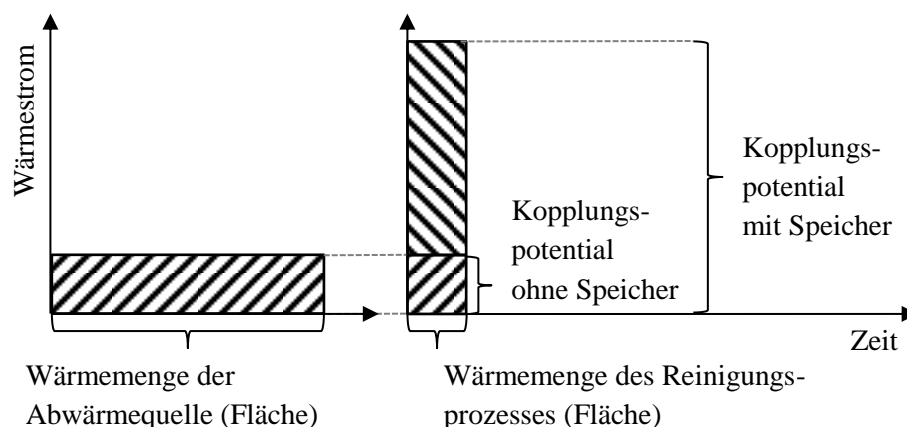


Abbildung 5-13: Methode der Speicherung zur Realisierung von Kopplungsprozessen

⁴⁷ Abbildung 5-12 wurde in Anlehnungen an [9] unter Verwendung eines eigenen Beispiels erstellt.

5.5 Bewertung dynamischer Verluste

Die tatsächliche Anlagennutzung unterscheidet sich von der in der Auslegung geplanten Nutzung durch einen dynamischen Betrieb. Das bedeutet, dass neben den Umwandlungsverlusten dynamische Verluste ergänzend zu betrachten sind. Abbildung 5-14 zeigt diesen Zusammenhang.

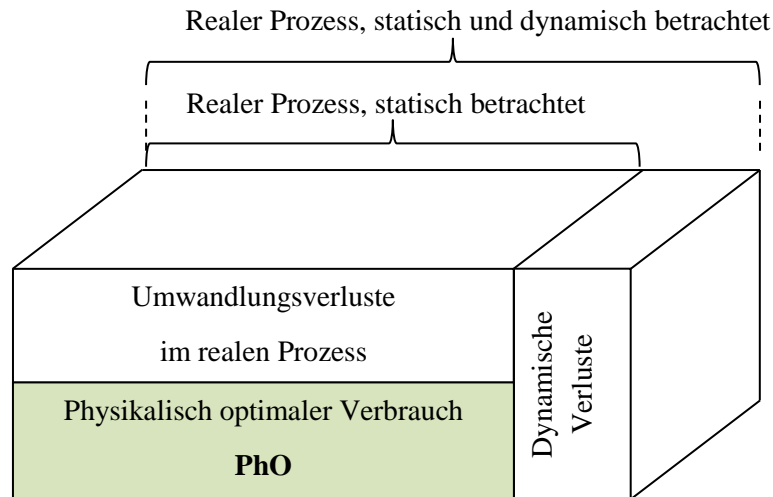


Abbildung 5-14: Statische und dynamische Verluste eines Prozesses

Die dynamischen Verluste sind durch die Auslastung einer Anlage (Anlagennutzung) bedingt. Beispiele für solche Verluste sind:

- Anfahrverluste, Abfahrverluste, Teillastfahrweise, Laständerung,
- nicht optimales Einstellen⁴⁸ von Betriebsparametern,
- Wartungszustand der Anlage und
- Reworkverluste.

⁴⁸ Hierbei ist sowohl der Sollwert einer Regelung durch den Bediener, als auch der Regelalgorithmus selbst gemeint.

Das Ergebnis der Bewertung der Anlagennutzung zeigt, wie die Anlage eingesetzt wird. Es wird insbesondere ersichtlich, welche dynamischen Verluste auftreten. Für die Bewertung des Verbrauches an Energien und Stoffen ist der Produktionsbetrieb P von der Stillstandsphase S (Bereitschaftsverluste) zu unterscheiden.

Zur Veranschaulichung werden die dynamischen Verluste an zwei Fällen erläutert:

- Fall A: Druckluftleckage als kontinuierlicher Verlust
- Fall B: Verluste durch elektrische Antriebe während Stillstandsphasen

Während der Produktionsphase werden nötiger Verbrauch P_N und Verlustanteil P_V unterschieden. Das Gleiche gilt für lebensmittelverarbeitende Fabriken auch in der Stillstandsphase. Häufig ist zur Lagerung der stetige Betrieb von Kühl-, Heiz- oder Rührwerkmaschinen S_N nötig, damit das Produkt nicht verdirbt. Ein großer Teil der eingesetzten Stoffe und Energien während der Stillstandsphasen sind jedoch Verluste S_V .

Abbildung 5-15 zeigt als Beispiel den Druckluftverbrauch einer Fabrik (Fall A). Leckagen unterscheiden sich von nicht abgeschalteten Verbrauchern (Fall B) insofern, als dass die Leckage während einer Nichtproduktionsphase (Beispiel: Weihnachten) gemessen wird, jedoch auch während der Produktion einen Verlust darstellt⁴⁹.

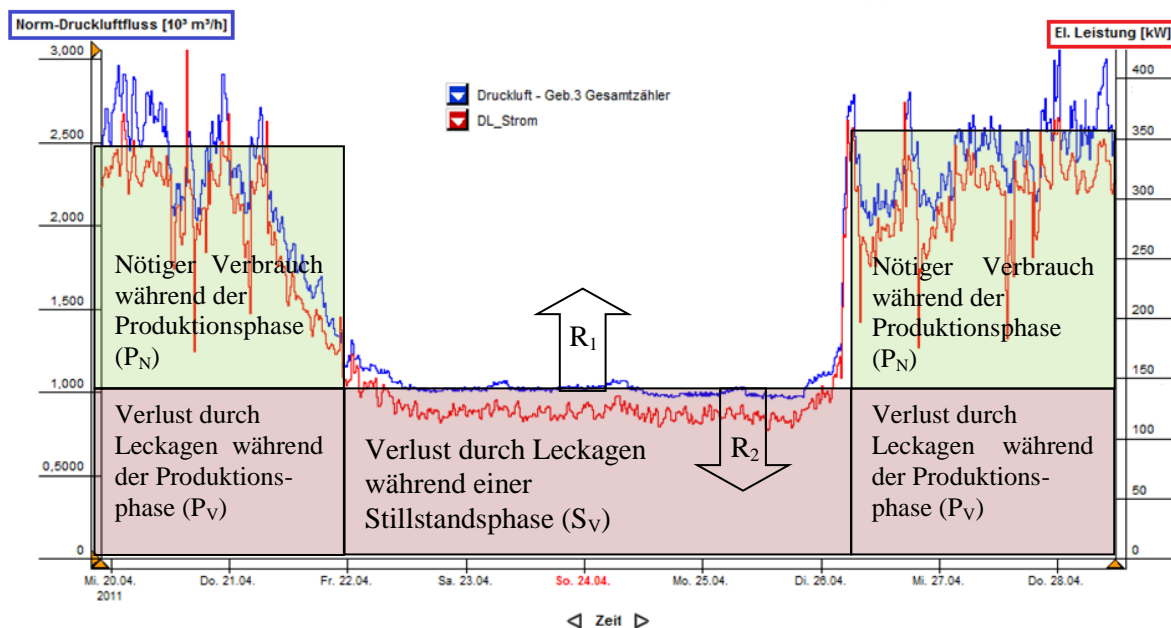


Abbildung 5-15: Druckluftleckage als durchgängiger Verlust (Fall A)

⁴⁹ Für die Bewertung der Druckluftverluste gelten zwei Randbedingungen:

R1: Alle Verbraucher, welche während der Produktion versorgt werden, werden auch in der Stillstandsphase versorgt und nicht abgesperrt. Werden Verbraucher während des Produktionsstillstandes abgesperrt, liegt die tatsächliche Leckage über der gemessenen.

R2: Während des Stillstandes werden tatsächlich keine Verbraucher nutzbringend versorgt ($S_N = 0$).

Nicht abgeschaltete Verbraucher hingegen sind nur während einer Stillstandsphase ein Verlust S_V . Ein Beispiel dafür sind Förderbänder. Während der Produktion werden diese Verbraucher benötigt. Abbildung 5-16 zeigt exemplarisch den Stromverbrauch während des Produktionsbetriebes und während der Stillstandsphase. Die Stillstandsphase zeigt exemplarisch den in der Nahrungsmittelproduktion nötigen Verbrauchsanteil S_N . Ein Beispiel dafür sind Rührwerke.

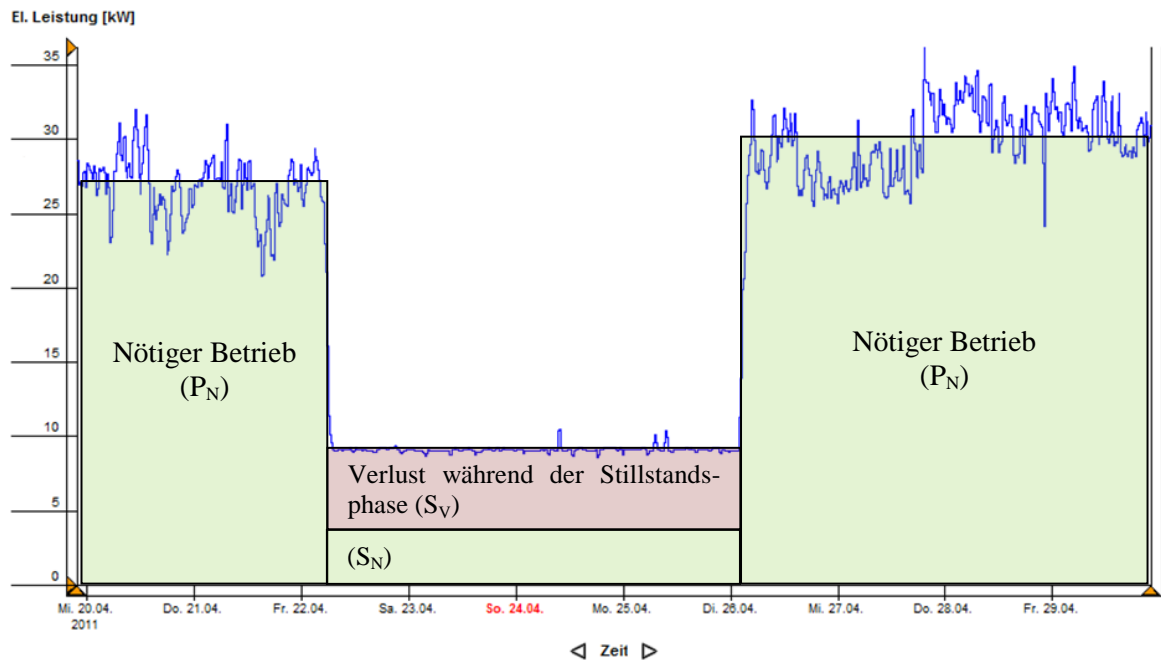


Abbildung 5-16: Elektrische Antriebe als Verluste während Stillstandsphasen (Fall B)⁵⁰

⁵⁰ An- und Abfahrverluste sowie Umwandlungsverluste von Prozessen werden sowohl in Fall A als auch in Fall B nicht betrachtet.

5.5.1 Wirkungsgrad und Nutzungsgrad

Eine Möglichkeit, die Effizienz einer Anlage unter Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens darzustellen, ist der Nutzungsgrad $\bar{\eta}$. Der Wirkungsgrad η , als erster Schritt zur Bewertung der Anlageneffizienz, das Verhältnis von aus Nutzen zu Aufwand (vgl. Kapitel 3.1).

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} \quad \text{GI 5-10}$$

Der Wirkungsgrad kann als Momentaufnahme betrachtet werden, welcher im Beharrungszustand einer Anlage bestimmt wird. Hersteller geben üblicherweise den Wirkungsgrad im Nennzustand an, in welchem der Wirkungsgrad meistens den höchsten Wert erreicht.

Der Nutzungsgrad hingegen ist das Verhältnis von Mittelwert des Nutzens und Mittelwert des Aufwandes innerhalb eines bestimmten Messzeitraumes:

$$\bar{\eta} = \frac{\bar{\text{Nutzen}}}{\bar{\text{Aufwand}}} \quad \text{GI 5-11}$$

Unter der Randbedingung, dass der Nennwirkungsgrad eines Systems der maximal erreichbare Wirkungsgrad des Systems ist, welcher in Abhängigkeit von der Auslastung erreicht werden kann, ist der Nutzungsgrad immer kleiner als der Nennwirkungsgrad. Der Grund dafür liegt darin, dass der Nutzungsgrad auch die während der Teillastfahrweise auftretenden dynamischen Verluste beinhaltet.

Neben dem Nutzungsgrad ist in der Literatur⁵¹ (vgl. Kapitel 3.1) die Aufwandszahl e bekannt, welche den Quotienten aus Aufwand und Nutzen und somit den Kehrwert des Nutzungsgrades darstellt:

$$e = \frac{\bar{\text{Aufwand}}}{\bar{\text{Nutzen}}} \quad \text{GI 5-12}$$

Diese Arbeit beschränkt sich nicht auf die Kennzahl des Nutzungsgrads, sondern stellt darüber hinaus den Nutzungsgrad bzw. die Aufwandszahl über der Auslastung des Systems dar. Ein übliches Vorgehen (vgl. Abbildung 2-3 und Abbildung 2-6) ist es, den spezifischen, d. h. auf die Produktionsmenge bezogenen Energie- oder Stoffverbrauch über der Auslastung der Anlage darzustellen.

⁵¹ In dieser Arbeit wird als Aufwand der Energie- oder Stoffaufwand und als Nutzen die erzeugte Produktionsmenge eingesetzt (vgl. auch BINDING (Abbildung 2-3) und DRUMM (Abbildung 2-6)).

Abbildung 5-17 zeigt exemplarisch den spezifischen elektrischen Energieaufwand e einer Produktionsfabrik über der Produktionsauslastung w_{nutz} in Tonnen Produkt pro Tonne Produkt bei Nennbedingung t_P/t_{PN} . In diesem Beispiel wurde der elektrische Energiebedarf einer Produktionsfabrik monatsweise ermittelt und um den Verbrauch witterungsabhängiger Verbraucher (Kältemaschinen) reduziert. Das Ausbalancieren der Kältemaschinen ist notwendig, da dieser Verbraucher im Sommer bei gleicher Produktionsleistung überproportional mehr verbraucht als im Winter. Die sich ohne eine solche Korrektur ergebende Problematik bei der kontinuierlichen Darstellung wird in Kapitel 5.5.3 (Seite 81) näher erläutert.

Es wird ersichtlich, dass der spezifische Aufwand für Produktionsmengen gegen null unendlich groß wird: $e(w_{\text{nutz}} \rightarrow 0) = \infty$.

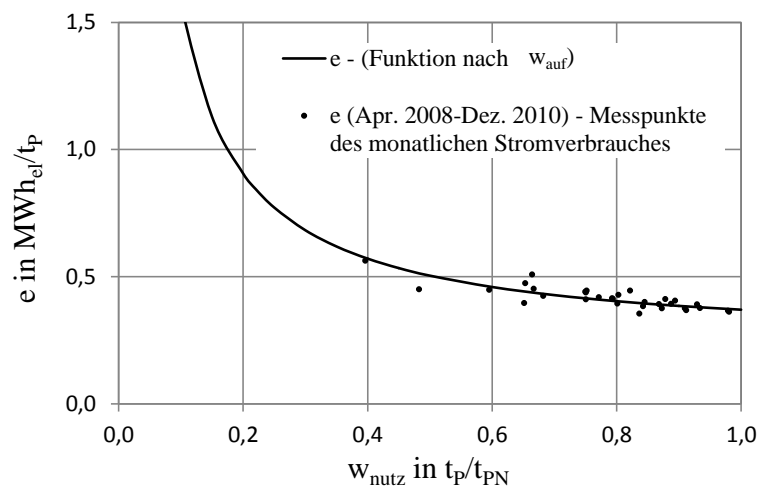


Abbildung 5-17: Spezifischer Energieaufwand in Abhängigkeit von der Produktionsauslastung

Abbildung 5-18 zeigt den Nutzungsgrad über der Produktionsauslastung. Bei einer Produktionsmenge von null, ist auch der Wirkungsgrad gleich null: $\bar{\eta}(w_{\text{nutz}} \rightarrow 0) = 0$.

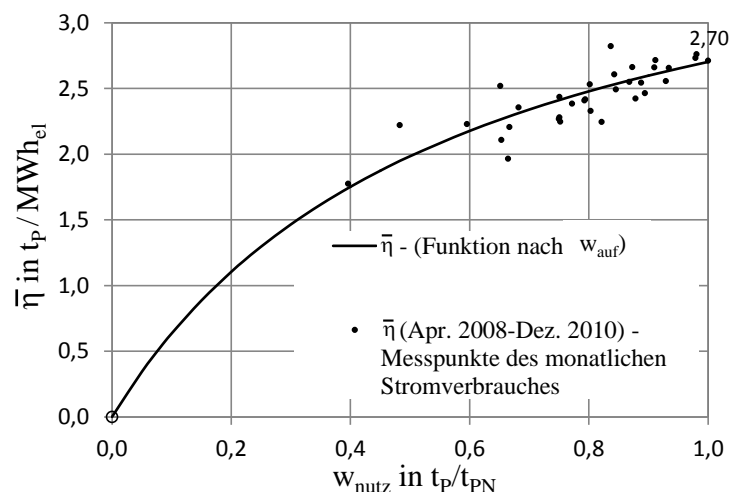


Abbildung 5-18: Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Produktionsauslastung

Beide Darstellungen (Abbildung 5-17 und Abbildung 5-18) bergen das Problem, dass bei einer Auslastung von null keine Aussage über den Energieeinsatz getroffen werden kann [46].

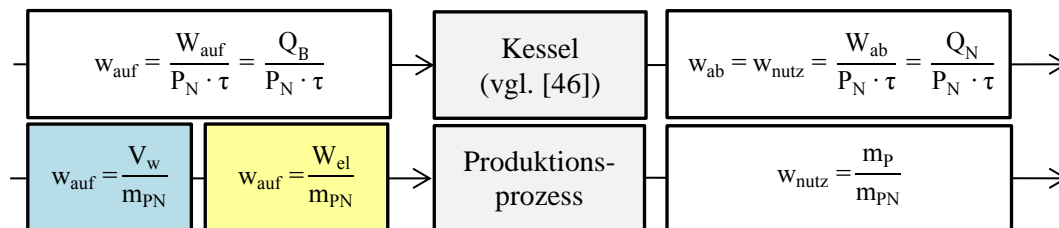
5.5.2 Der normierte Aufwand

Die Abhängigkeit des Aufwands vom Nutzen kann vereinfacht als lineare Funktion dargestellt werden. In den Wirtschaftswissenschaften (vgl. beispielsweise MÜLLER [39]) werden als Aufwand die Kosten und als Nutzen die Absatzmenge verwendet. BINDING zeigt den linearen Zusammenhang zwischen Energieeinsatz und Produktionsleistung (vgl. Abbildung 2-3).

ROUVEL [46] ist es durch die Normierung des Aufwands und des Nutzens auf die Kesselnennleistung P_N gelungen, eine Relation zur Aufwandszahl e und zum Nutzungsgrad $\bar{\eta}$ herzustellen.

In dieser Arbeit wird für den Nutzen anstatt der Nennleistung eines Kessels die Nennproduktionsmenge m_{PN} – wie in Abbildung 5-17 und Abbildung 5-18 bereits geschehen – verwendet.

Abbildung 5-19 zeigt die bilanziellen Eingangs- und Ausgangsgrößen zur Anwendung der Methode. Die blaue Darstellung zeigt beispielhaft die Normierung des Wasserverbrauches V_w , die gelbe Darstellung die Normierung des elektrischen Energieverbrauches W_{el} .



- W_{auf} : Aufwand (nach ROUVEL: Energieaufwand)
- W_{ab} : Nutzabgabe (nach ROUVEL: Nutzenergieabgabe)
- w_{auf} : normierter Aufwand
- w_{nutz} : normierter Nutzen
- m_P : Produktionsmenge
- m_{PN} : Nennproduktionsmenge

Abbildung 5-19: Der normierte Aufwand in Produktionsprozessen (modifiziert nach [46])

Der normierte Aufwand w_{auf} wird als lineare Funktion durch den Bereitschaftsverlust $w_{auf,0}$, zuzüglich der während der Nutzungsphase auftretenden Verbräuche ($a \cdot w_{nutz}$) beschrieben:

$$w_{auf} = a \cdot w_{nutz} + w_{auf,0} \quad \text{Gl 5-13}$$

mit

$$a = \frac{1}{\eta_N} - w_{auf,0} \quad \text{Gl 5-14}$$

nach [46].

Durch die Teilung des normierten Aufwands durch den normierten Nutzen ergibt sich die Aufwandszahl e [46]:

$$\frac{w_{\text{auf}}}{w_{\text{nutz}}} = e = \frac{w_{\text{auf},0}}{w_{\text{nutz}}} + a \quad \text{Gl 5-15}$$

Der Quotient $\frac{w_{\text{auf},0}}{w_{\text{nutz}}}$ beschreibt die Hyperbelfunktion.

Der Nutzungsgrad ist gleich dem Kehrwert der Aufwandszahl e [46]:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{e} = \frac{w_{\text{nutz}}}{a \cdot w_{\text{nutz}} + w_{\text{auf},0}} \quad \text{Gl 5-16}$$

Abbildung 5-20 zeigt beispielhaft den normierten Aufwand in Abhängigkeit des normierten Nutzens. Zu erkennen ist der Basisverbrauch $w_{\text{auf},0}$ (bei einer Produktionsauslastung von $w_{\text{nutz}} = 0$). Betrachtet man Gl 5-13 an der Stelle $w_{\text{nutz}} = 1$ ergibt sich der Kehrwert des Nennwirkungsgrades:

$$w_{\text{auf},1} = a \cdot 1 + w_{\text{auf},0} = \frac{1}{\eta_N} - w_{\text{auf},0} \cdot 1 + w_{\text{auf},0} = \frac{1}{\eta_N} \quad \text{Gl 5-17}$$

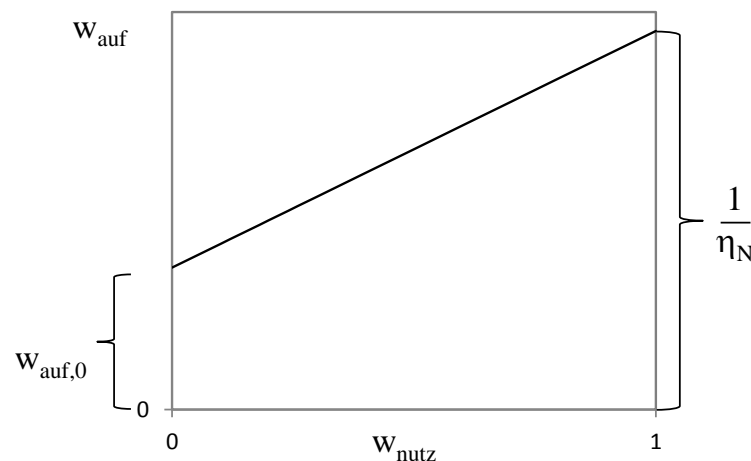


Abbildung 5-20: Normierter Aufwand w_{auf} (nach [46])

Die Methode des normierten Aufwands kann nicht bzw. nur als Näherung genutzt werden, wenn die Grundlage für die lineare Darstellung nicht gegeben ist.

Ein Beispiel dafür ist ein Ansteigen des spezifischen Verbrauches bei Überlast. Abbildung 5-21 zeigt diesen Zustand, welcher auch von ERLACH [20] beschrieben wird. In diesem Fall wird keine Hyperbelfunktion nach Gl 5-15 dargestellt. Die Grundlage für die lineare Darstellung nach Gl 5-13 ist somit auch nicht gegeben.

Ein weiteres Beispiel ist ein Brennwertkessel, welcher im Teillastverhalten aufgrund der niedrigen Systemtemperaturen einen höheren Nutzungsgrad aufweist [46]. Der höhere Nutzungsgrad bei niedrigen System- bzw. Rücklauftemperaturen ist in diesem Fall durch den Kondensationsbetrieb begründet (vgl. Taupunktunterschreitung in Abbildung 4-17).

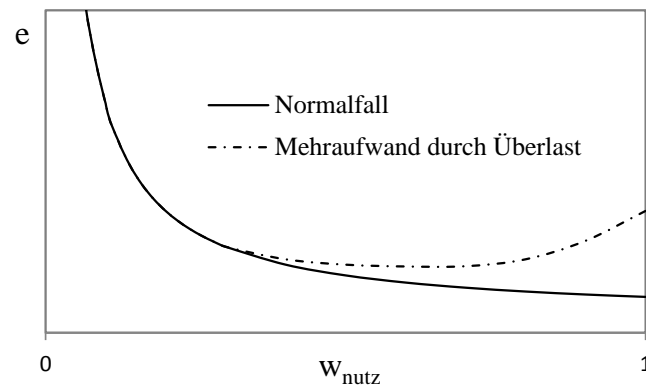


Abbildung 5-21: Steigung des spezifischen Verbrauches bei Überlast

Das Physikalische Optimum kann in die Methode des normierten Aufwands integriert werden:

1. Zur Vereinfachung wird zwischen $w_{auf,0}$ und $w_{auf,1}$ – ebenso wie beim normierten Aufwand nach ROUVEL – ein linearer Zusammenhang angenommen.
2. Die Bereitschaftsverluste $w_{auf,0}$ sind im physikalischen Optimalfall gleich null. Das Physikalische Optimum ist für den Vollastfall $w_{auf,1}$ berechenbar.

Der normierte Aufwand – unter physikalisch optimalen Bedingungen $w_{auf,PhO}$ – wird im Folgenden auch als f_{PhO} beschrieben:

$$f_{PhO} = f(w_{nutz})_{PhO} = w_{auf, PhO} \quad \text{GI 5-18}$$

Abbildung 5-22 zeigt den normierten Aufwand des realen Prozesses und des Physikalischen Optimums f_{PhO} in Abhängigkeit von w_{nutz} . Das Physikalische Optimum ist bei Vollast $f_{PhO,1}$ kleiner als der normierte Aufwand des realen Prozesses $w_{auf,1}$. Daraus ergibt sich, dass der Nennwirkungsgrad im physikalischen Optimalfall größer ist (vgl. Abbildung 5-20).

$$f_{PhO,1} < w_{auf,1} \quad \text{GI 5-19}$$

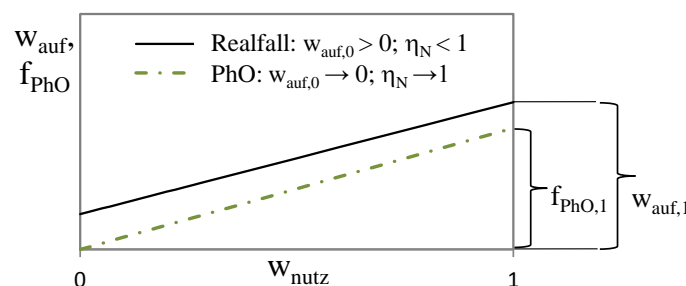


Abbildung 5-22: Das Physikalische Optimum⁵² als Funktion f_{PhO}

⁵² Dass der Nutzungsgrad $\bar{\eta}$ in der Darstellung gegen eins strebt, ist beispielhaft, muss jedoch auch im Optimalfall nicht so sein. Hintergrund ist, dass das Optimum idealer Prozesse unter eins liegen kann. Dies ist beispielsweise bei der Bewertung von Wärmerzeugern (vgl. Anhang Seite 115) zu erkennen. Auch im physikalischen Optimalfall liegt der Wirkungsgrad unter eins.

Um das Physikalische Optimum durch die Aufwandszahl e und als Nutzungsgrad $\bar{\eta}$ darzustellen, werden Gl 5-15 und Gl 5-16 in Bezug auf das Physikalische Optimum untersucht. Die Hyperbelfunktion e ist für Werte ($0 < w_{\text{nutz}} \leq 1$) gleich dem Kehrwert des Nennwirkungsgrades:

$$\begin{aligned} e_{\text{PhO}}(0 < w_{\text{nutz}} \leq 1) &= \frac{w_{\text{auf},0}}{w_{\text{nutz}}} + \left(\frac{1}{\eta_N} - w_{\text{auf},0} \right) \\ &= \frac{0}{w_{\text{nutz}}} + \left(\frac{1}{\text{konst.}} - 0 \right) = \frac{1}{\eta_N} = \text{konst.} \end{aligned} \quad \text{Gl 5-20}$$

Der Nutzungsgrad $\bar{\eta}$ ist für Werte ($0 < w_{\text{nutz}} \leq 1$) gleich dem Nennwirkungsgrad:

$$\begin{aligned} \bar{\eta}_{\text{PhO}}(0 < w_{\text{nutz}} \leq 1) &= \frac{w_{\text{nutz}}}{a \cdot w_{\text{nutz}} + w_{\text{auf},0}} = \frac{w_{\text{nutz}}}{\left(\frac{1}{\eta_N} - w_{\text{auf},0} \right) \cdot w_{\text{nutz}} + w_{\text{auf},0}} \\ &= \frac{w_{\text{nutz}}}{\left(\frac{1}{\eta_N} - 0 \right) \cdot w_{\text{nutz}} + 0} = \eta_N = \text{konst.} = \frac{1}{e} \end{aligned} \quad \text{Gl 5-21}$$

Für $w_{\text{nutz}} \rightarrow 0$ ist eine einfache Grenzwertbetrachtung sowohl für die Aufwandszahl e , als auch für den Nutzungsgrad $\bar{\eta}$ nicht mit einer Lösung innerhalb der Elemente der reellen Zahlen möglich. Nach der Regel von Bernoulli-de L'Hospital⁵³ kann dieses Problem durch die separate Differenzierung des Zählers und des Nenners gelöst werden.

Die Berechnung (siehe Anhang: Seite 117) liefert für $w_{\text{nutz}} \rightarrow 0$ sowohl für die Aufwandszahl e , als für den Nutzungsgrad $\bar{\eta}$ das gleiche Ergebnis wie Gl 5-20 und Gl 5-21:

$$e_{\text{PhO}}(0) = \lim_{w_{\text{nutz}} \rightarrow 0} (e) \stackrel{\text{L'H}}{=} \frac{1}{\eta_N} \quad \text{Gl 5-22}$$

$$\bar{\eta}_{\text{PhO}}(0) = \lim_{w_{\text{nutz}} \rightarrow 0} (\bar{\eta}) \stackrel{\text{L'H}}{=} \eta_N \quad \text{Gl 5-23}$$

Abbildung 5-23 zeigt schließlich das Physikalische Optimum als Aufwandszahl e (links) und als Nutzungsgrad $\bar{\eta}$ (rechts) im Vergleich zu einem fiktiven Realfall.

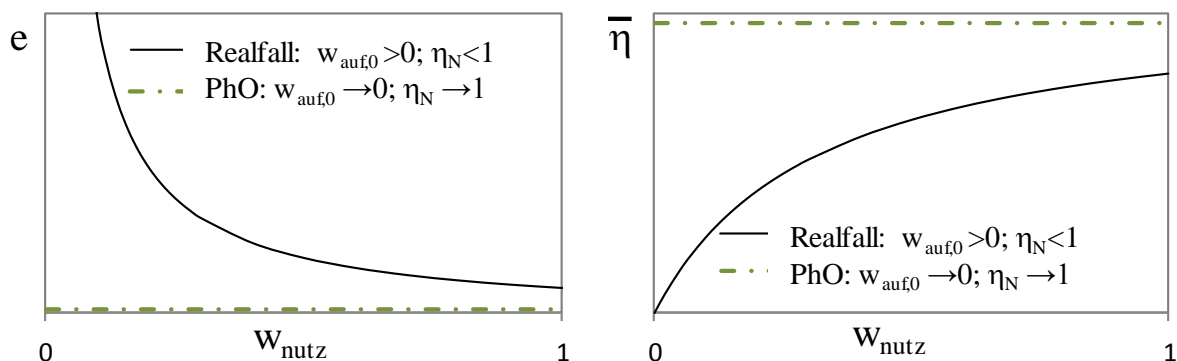


Abbildung 5-23: Aufwandszahl und Nutzungsgrad im physikalischen Optimalfall

⁵³ Die Regeln sind benannt nach GUILLAUME FRANCOIS ANTOINE, MARQUIS DE L'HOSPITAL (1661–1704), der sie allerdings nicht selbst entdeckte, sondern aus einem Kurs von JOHANN BERNOULLI übernahm und 1696 veröffentlichte. [33]

5.5.3 Erläuterung am Beispiel eines elektrischen Verbrauchers

Abbildung 5-24 zeigt den normierten Aufwand (Stromverbrauch) einer Fabrik über der Produktionsauslastung⁵⁴. Die lastabhängigen Verluste werden als linear angenommen und haben für das Beispiel keinen Anspruch auf quantitative Richtigkeit. Neben lastunabhängigen Verlusten (Bereitschaftsverlusten) und lastabhängigen Verlusten ist der Nutzenergieanteil zu erkennen. Die Nutzenergie besteht aus einem physikalisch erforderlichen Anteil (PhO-Anteil der Nutzenergie) und einem Anteil, welcher nach den Randbedingungen der Physik als Verlust zu betrachten ist.

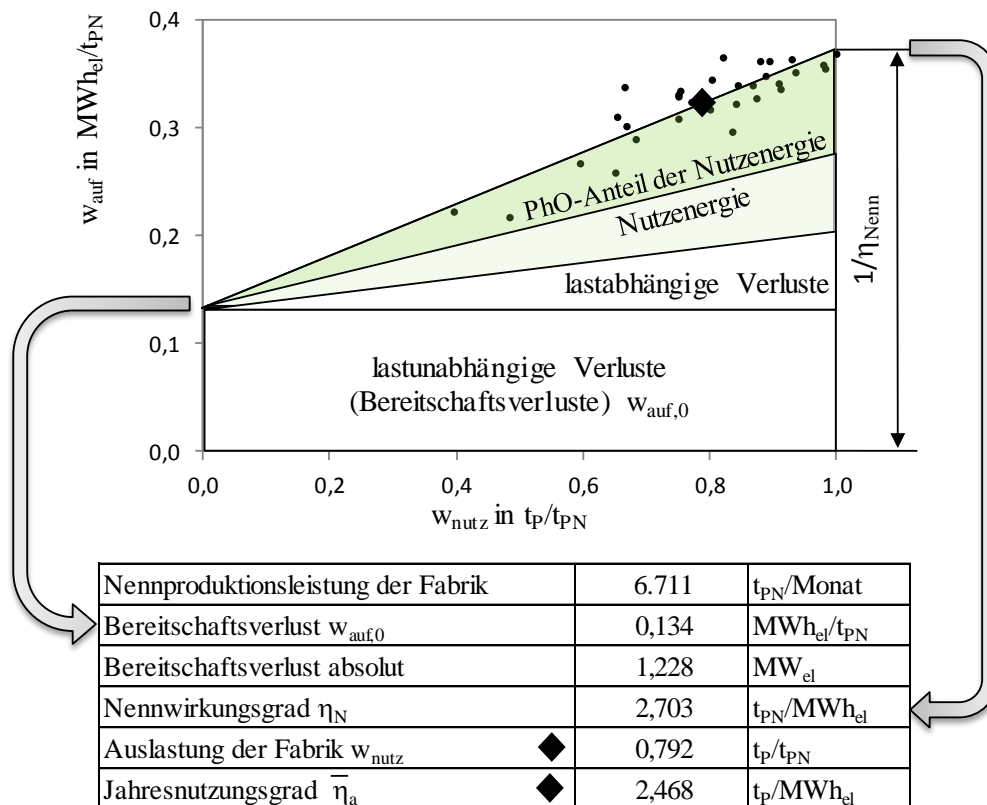


Abbildung 5-24: Normierter Aufwand am Beispiel eines elektrischen Verbrauchers

Die Nennproduktionsleistung der Fabrik wurde mit 6.711 t_{PN} pro Monat ermittelt und angenommen. Der Bereitschaftsverlust der Fabrik liegt nach der Methode des normierten Aufwands bei 0,134 MWh_{el}/t_{PN} . Wird dieser Wert mit der Nennproduktionsleistung multipliziert, ergibt sich der absolute Bereitschaftsverlust von 1,228 MW_{el} . Der Nennwirkungsgrad (im Diagramm als reziproker Wert dargestellt) liegt bei 2,703 t_{PN}/MWh_{el} . Zur Veranschaulichung und Kontrolle zeigt Abbildung 5-24 den Jahresnutzungsgrad (2,468 t_P/MWh_{el}), welcher bei einer mittleren Auslastung von 79,2 % liegt.

⁵⁴ Die abgebildeten Messdaten aus Abbildung 5-24 sind dieselben wie jene aus Abbildung 5-17 und Abbildung 5-18. Die Funktionen aus Abbildung 5-17 (Aufwandszahl e) und Abbildung 5-18 (Nutzungsgrad $\bar{\eta}$) konnten über die einfache Bestimmung der linearen Funktion aus Abbildung 5-24 über Gl 5-16 berechnet werden und somit in einer hohen Qualität – insbesondere für den Bereich der geringen Auslastung – dargestellt werden.

Zur Plausibilisierung wird in Abbildung 5-25 der Lastgang für Strom aus dem Jahr 2012 gezeigt. Der darin enthaltene Grundlastverbrauch müsste um die Stromaufnahme der Kältemaschinen reduziert werden und könnte dann mit dem Basisverbrauch des normierten Aufwands verglichen werden. Der Wert von etwa einem Megawatt ist niedriger als der Basisverbrauch des normierten Aufwands aus Abbildung 5-24 (1,228 MW), obwohl hier die Stromaufnahme der Kältemaschinen nicht mitbetrachtet wurde. Die Ursache für die Abweichung kann einerseits in der Grobheit der Messungen auf Monatsbasis liegen, andererseits in der Variation von Produktionsmengen unterschiedlicher Energieintensivität innerhalb des Messzeitraumes. Außerdem können Witterungseinflüsse die Darstellung verfälschen, beispielsweise über den außentemperaturbedingt unterschiedlichen Betrieb von Lüftermotoren, sowie dezentrale, nicht bilanzierte Kältemaschinen.

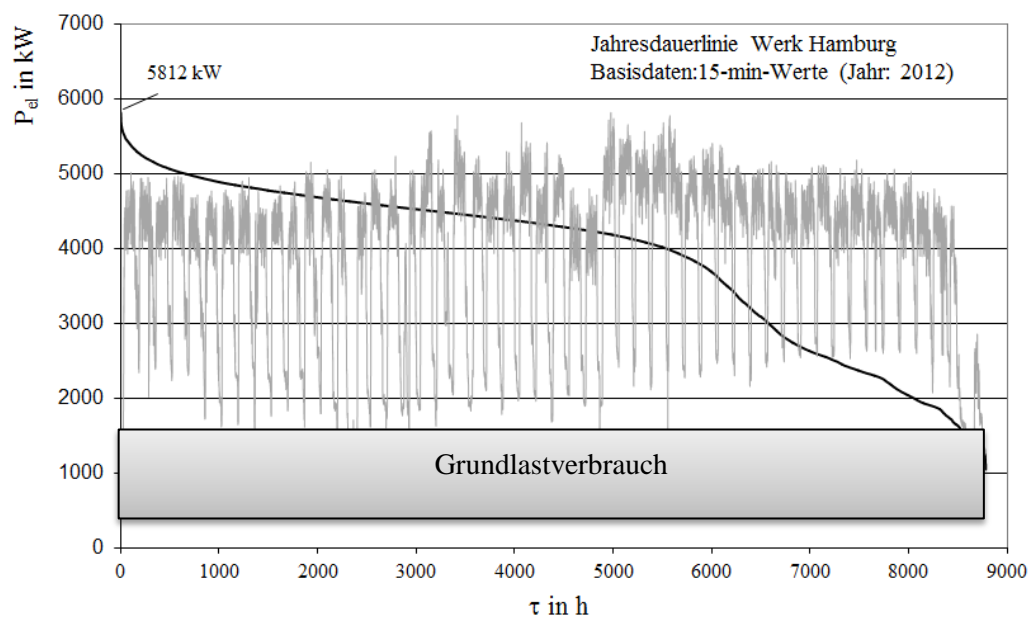


Abbildung 5-25: Stromlastgang einer Fabrik

Für die Systematik kann daher Folgendes abgeleitet werden:

In vielen Fällen ist der Bereitschaftsverlust durch Messungen an produktionsfreien Tagen bekannt. Das Analysieren der Prozesse während Stillstandsphasen hat daher eine besondere Bedeutung. Die Produktionsauslastung w_{nutz} ist in diesem Fall gleich null. Die Berücksichtigung des gemessenen Bereitschaftsverlustes sollte die Regressionsfunktion nicht stark verändern, wenn exakte Messungen und keine störenden Randbedingungen vorliegen. Störende Randbedingungen sind beispielsweise:

- hoher Anteil an Ausschuss, welcher nicht die Produktionsmenge erhöht, jedoch den Energie- und Stoffaufwand,
- unterschiedlich starke Auslastungen von Produktionslinien mit verbrauchsintensiven Produkten,
- Einflüsse durch die Witterung (im Sommer ist erfahrungsgemäß der Strom- und Wasserbedarf einer Fabrik höher als im Winter, ohne dass eine größer Produktmenge erzeugt wird, im Winter dagegen liegt der Gasbedarf meistens höher).

5.5.4 Systematik zur Darstellung des dynamischen Verhaltens

Die Systematik in Abbildung 5-26 zeigt Schrittweise das Vorgehen, bei der Beschreibung des dynamischen Verhaltens.

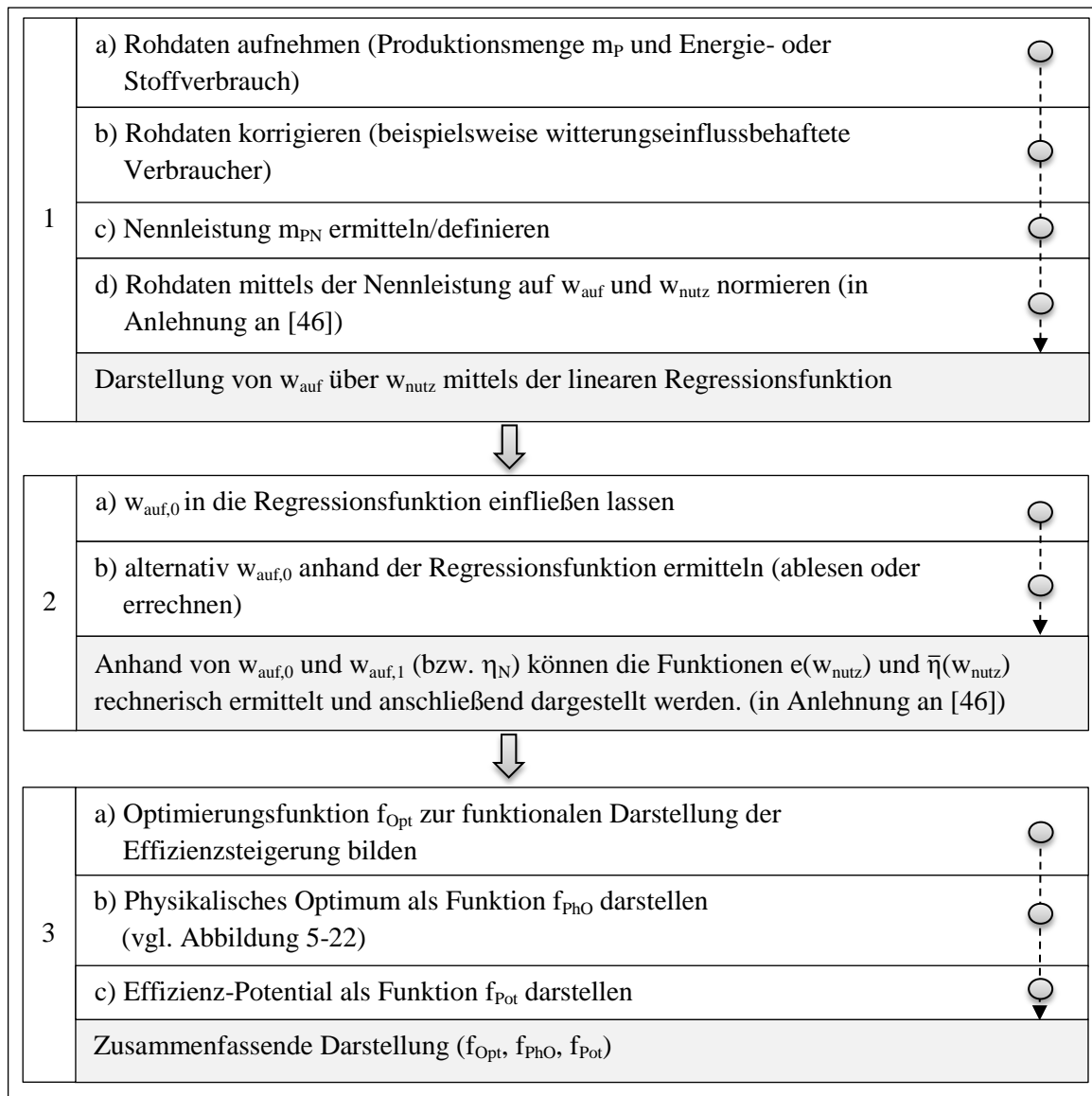


Abbildung 5-26: Systematik zur Darstellung des dynamischen Verhaltens

Zu den in Abbildung 5-26 dargestellten Schritten ist Folgendes anzumerken:

Zu 1a)

Zur Produktionsmenge gehört in diesem Fall auch Ausschuss, welcher die Prozesskette durchlaufen hat. Hintergrund ist, dass die Methode als Nutzen den durch Energie- und Stoffeinsatz hergestellten Output bewertet. Ein Produkt, welches zu wenig wiegt und somit nicht verkaufsfähig ist, verursacht einen ähnlich hohen Verbrauch, wie ein Produkt mit Plan-Gewicht.

Zu 1b)

Im Beispiel aus Abbildung 5-24 ist der Stromverbrauch der Kältemaschinen, der im Sommer höher liegt als im Winter, herausgerechnet worden (Begründung vgl. Kapitel 5.5.3 (Seite 81)).

Zu 1c)

Die Nennleistung ist ein bestimmter Referenzwert. Für eine Fabrik kann beispielsweise die produktionsstärkste Woche als Referenz definiert werden.

Zu 2a)

In diesem Schritt ist auch denkbar, den Kehrwert des Nennwirkungsgrades $w_{\text{auf},1}$, sofern verfügbar, einfließen zu lassen. Wenn noch keine Messwerte vorliegen, um die Funktion darzustellen, zum Beispiel weil sich der Prozess noch im Planungszustand befindet, kann die Funktion mittels der beiden Werte $w_{\text{auf},0}$ und $w_{\text{auf},1}$ auch simuliert werden. Insbesondere für energietechnische Anlagen, wie z. B. Kesselanlagen, ist der Nennwirkungsgrad meistens bekannt.

Zu 3a)

Die Differenz der Funktion des Bezugszeitraumes $f(w_{\text{nutz}})_{\text{BZ}}$ und des aktuellen Zeitraumes $f(w_{\text{nutz}})_{\text{AZ}}$ ergibt die Optimierung als Funktion f_{Opt} auf Basis von Gl 5-13.

$$\begin{aligned} f_{\text{Opt}} &= f(w_{\text{nutz}})_{\text{BZ}} - f(w_{\text{nutz}})_{\text{AZ}} \\ &= w_{\text{auf,BZ}} - w_{\text{auf,AZ}} \\ &= (a_{\text{BZ}} - a_{\text{AZ}}) \cdot w_{\text{nutz}} + (w_{\text{auf},0,\text{BZ}} - w_{\text{auf},0,\text{AZ}}) \end{aligned} \quad \text{Gl 5-24}$$

Abbildung 5-27 zeigt beispielhaft die Funktion f_{Opt} . Je größer die Funktion, desto größer war die Optimierung in Bezug auf den Verbrauch und umgekehrt.

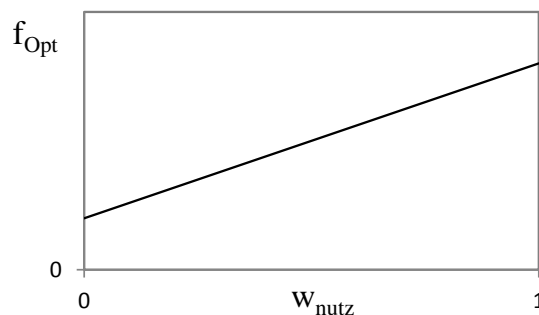


Abbildung 5-27: Optimierungsfunktion f_{Opt} ⁵⁵

Zu 3c)

Wird der Bestandsverbrauch w_{auf} , oder – sofern bekannt – der optimierte Verbrauch des Bestandes, um den physikalisch optimalen Verbrauch f_{PhO} (Gl 5-18) reduziert, ergibt sich daraus das Effizienz-Potential als Funktion f_{Pot} . Die Funktion zeigt das verbleibende Potential für weitere Verbesserungen im Hinblick auf das Physikalische Optimum auf.

$$f_{\text{pot}} = w_{\text{auf}} - f_{\text{PhO}} \quad \text{Gl 5-25}$$

⁵⁵ Es ist denkbar, dass die Funktion im Gegensatz zu Abbildung 5-27 auch als Konstante erscheinen oder eine negativer Steigung haben kann.

Für Fall A (vgl. Abbildung 5-15 Druckluftleckagen) wäre die Funktion f_{Opt} eine Konstante. Die Verluste sind über die gesamten Auslastung ($w_{\text{nutz}} = 0 \dots 1$) signifikant und konstant.

Für Fall B (elektrische Antriebe) wäre die Funktion f_{Opt} eine lineare Funktion, welche für $w_{\text{auf},1}$ gleich null ist.

5.5.5 Fazit

Der produktionsspezifische Verbrauch einer Fabrik ist von Effizienzmaßnahmen von der Auslastung der Produktion abhängig. Wenn wenig produziert wird, steigt der spezifische Verbrauch und umgekehrt. Somit ist der spezifische Verbrauch nur dann aussagekräftig, wenn die Produktionsmengen in den zu vergleichenden Zeiträumen identisch sind oder nur geringfügig voneinander abweichen.

Die Methode des normierten Aufwands liefert für diese Problematik eine allgemeingültige Lösung:

- Es wird nicht nur der spezifische Verbrauch als Nutzungsgrad (beispielsweise Jahresnutzungsgrad) dargestellt, sondern vom Bereitschaftsverlust (Auslastung gleich null) bis zur Vollausslastung des Prozesses die Funktion in Abhängigkeit der Prozess-Auslastung abgebildet.
- Zur Bewertung und Darstellung der Effizienzsteigerung eines Prozesses kann nun der spezifische Verbrauch als Funktion vor und nach der Effizienzmaßnahme gegenübergestellt werden. Diese funktionale Bewertung des hat den Vorteil, dass die Auslastung der Produktion der zu vergleichenden Zeiträume keinen Einfluss auf das Ergebnis hat.

Abbildung 5-28 zeigt die Funktionen f_{PhO} , f_{Pot} und f_{Opt} als aufgeschichtete Darstellung.

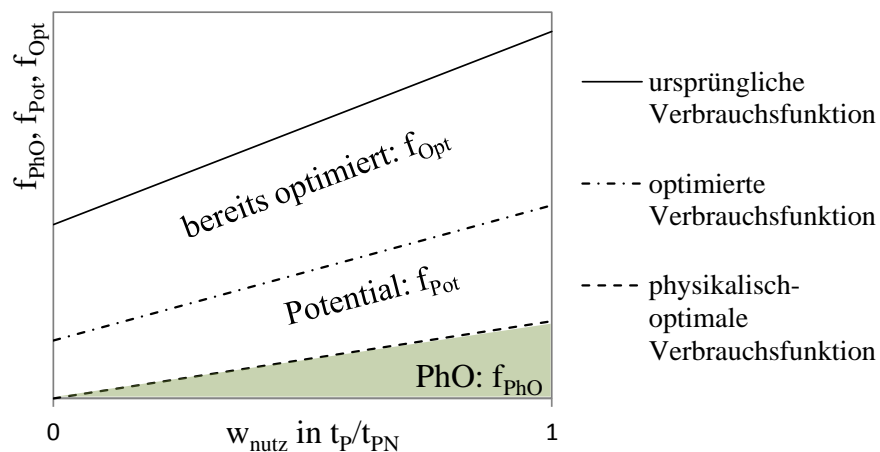


Abbildung 5-28: Beispielhafte Ergebnisdarstellung des dynamischen Verbrauches

5.6 Auswertung mittels Verlustkaskade

Ist-Situation (Brownfield-Fabrik) und der Zustand einer neuen Fabrik (Greenfield-Fabrik) können anschaulich als Verlustkaskade (vgl. DRUMM [15] in Kapitel 2.3) dargestellt werden. Das Physikalische Optimum und der PhO-Faktor (vgl. Gl 4-3) können integriert werden.

Abbildung 5-29 zeigt zunächst den Bestandsverbrauch (Brownfield). Unter Berücksichtigung der reduzierbaren – ggf. bereits reduzierter Verluste – ergibt sich der Verbrauch einer neuen Fabrik, Anlage oder Linie (Greenfield)⁵⁶. Bei den Verlusten im Greenfieldzustand werden dynamische und statische Verluste unterscheiden. Die Bilanzdifferenz wurde in diesem Beispiel den dynamischen Verlusten zugeordnet.

Das Physikalische Optimum wurde zur Veranschaulichung in die physikalischen Optima der Einzelprozesse zerlegt. Die Prozesse zwei bis vier haben einen physikalischen Optimalverbrauch von null. Das Produkt selbst beinhaltet in manchen Fällen einen Teil der eingesetzten Energie bzw. des eingesetzten Stoffs.

Das Potential für externe Kopplungsprozesse deutet an, dass ein Teil des Verbrauches in externen Prozessen wiedergenutzt werden bzw. der Verbrauch durch die Nutzung externer Quellen reduziert werden könnte.

Die Klassifizierung wird in dieser Arbeit durch den PhO-Faktor vorgenommen, welcher in der Verlustkaskade dargestellt ist.

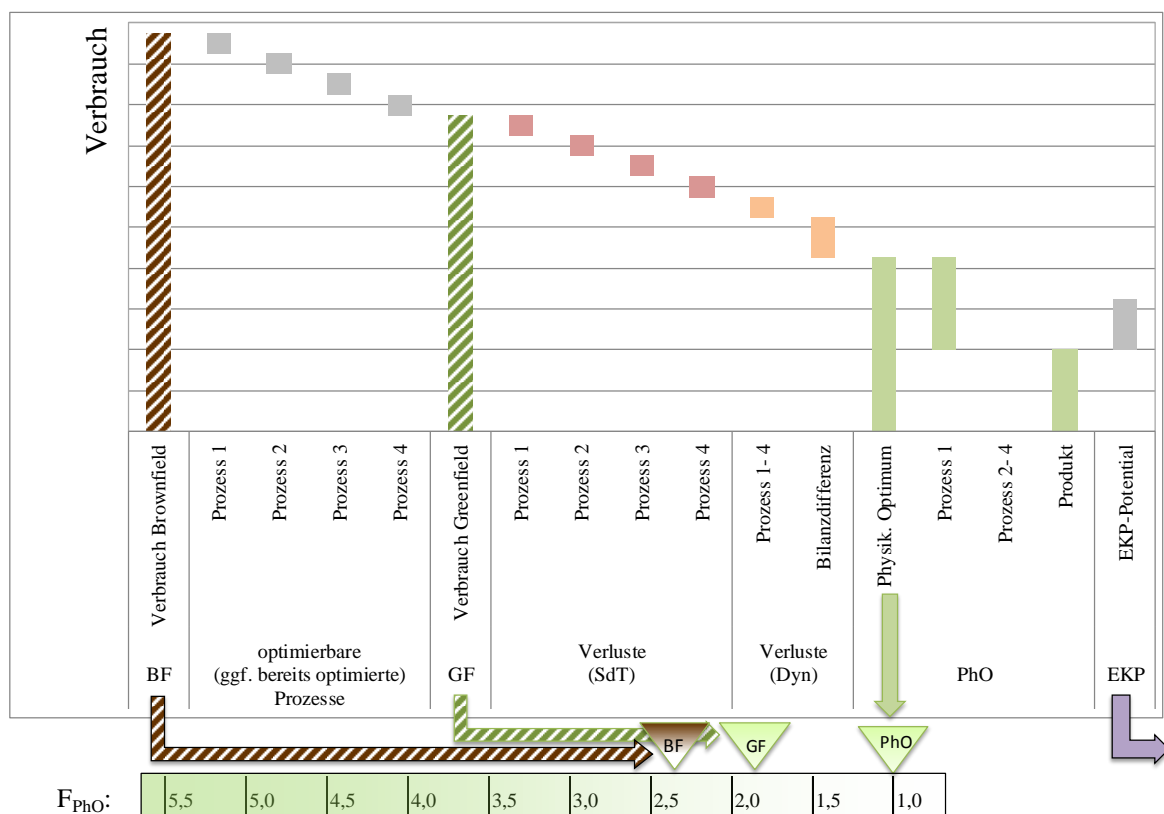


Abbildung 5-29: Verlustkaskade (vom Brownfield zum Physikalischen Optimum)

⁵⁶ Zur Vereinfachung der Darstellung wurde auf die Differenzierung in dynamische und statische Verluste an dieser Stelle verzichtet.

5.7 Ableitung der Handlungsmotivation

Aus den Ergebnissen der Bewertung kann anhand von Abbildung 5-30 die Handlungsmotivation abgeleitet werden. Es können ökonomische und/oder ökologische Aspekte Berücksichtigung finden.

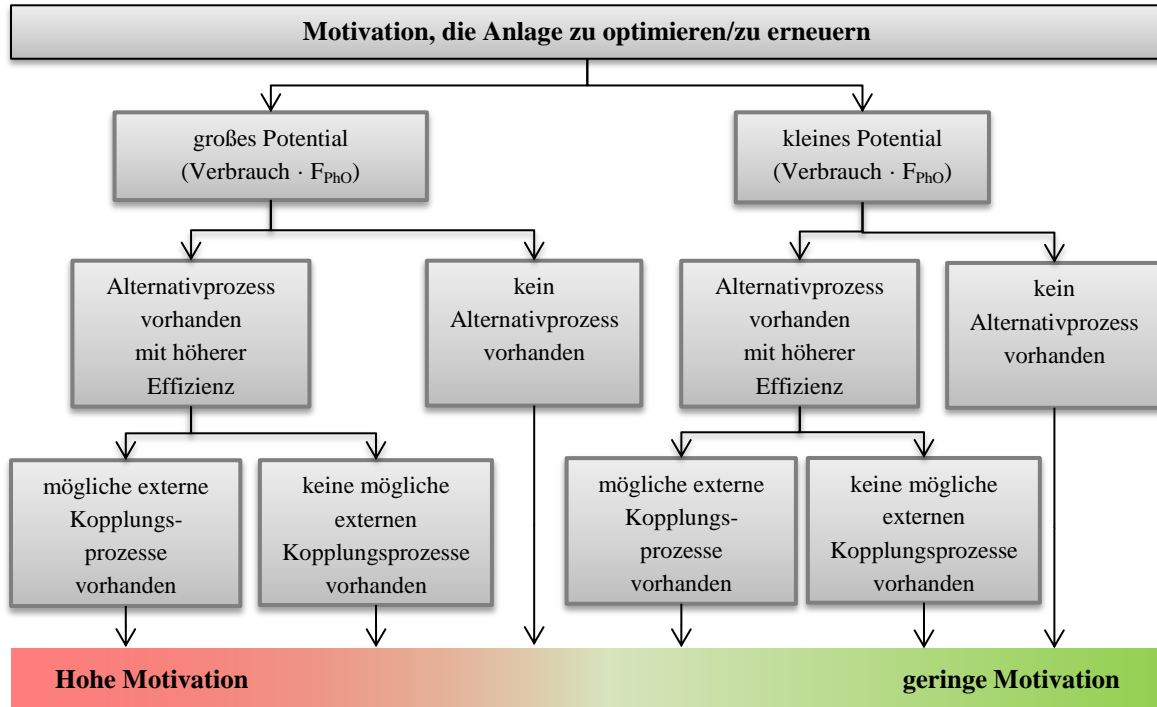


Abbildung 5-30: Handlungsmotivation zum Optimieren

Hintergrund dieser Darstellung ist eine einfache Beschreibung des Potentials, welches eine Fabrik im Hinblick auf eine Optimierung bietet. Mittels solcher Darstellungen könnten verschiedene Fabriken eines Konzerns verglichen und einzeln bewertet werden.

5.8 Handlungssystematik für Planung und Betrieb

Die Handlungssystematik nach Abbildung 5-31 soll als Hilfestellung, sowohl für die Planung als auch für den Betrieb von Anlagen dienen. Es werden drei Phasen unterschieden.

Phase 1 – Prozessanforderung (P):

In der Phase der Prozessanforderung sollte im ersten Schritt die eigentliche Funktion eines Prozesses definiert werden. So ist zum Beispiel für das Schmelzen von Schokolade eine Wärmezufuhr auf einem Temperaturniveau von 45 °C erforderlich. Das kann auf verschiedenen Wegen gewährleistet werden:

- Betreiben eines Dampfkessels mit anschließenden Wärmeübertragern
- elektrisch betriebene Heizung
- Abwärmenutzung aus einem Kraftwerksprozess

Für bestehende Prozesse kann in Phase 1 überlegt werden, ob Teilprozesse/Betriebsmittel überhaupt noch benötigt werden oder ob der Prozess verzichtbar ist.

Phase 2 – Anlagentechnik (T):

Die Bewertung der Anlagentechnik fokussiert – zunächst unter der Voraussetzung einer stationären Anlagennutzung – die Optimierung oder Planung der Prozesse im Hinblick auf das Physikalische Optimum.

Der Produktionsprozess hat ein Physikalisches Optimum, welches als Referenz dienen soll. Den Blickwinkel erweiternd, sollten alternative Prozesse angedacht werden, mit denen das gleiche Produkt mit einem geringeren Aufwand an energetischen und stofflichen Ressourcen hergestellt werden könnte. Insbesondere für ältere Bestandanlagen gibt es möglicherweise alternative Verfahren.

Das Physikalische Optimum ist abhängig vom gewählten Prozess. Daher sind alle Prozesse, die ein bestimmtes Produkt herstellen können, separat zu bewerten.

Die Systematiken der vorangegangenen Kapitel können für Phase 2 genutzt werden:

- Beschreibung des Produktionsprozesses (vgl. Kapitel 5.1)
- Beschreibung der Technischen Medien (vgl. Kapitel 4.5)
- Bewertung des Gesamtsystems (vgl. Kapitel 5.3)
- Bewertung der Physikalischen Optima der Prozesse (vgl. Kapitel 4)
- Aufzeigen von Optimierungsmöglichkeiten für bestehende Prozesse, beispielsweise mittels erweiterter Pareto-Analyse (vgl. Kapitel 5.1.2) und/oder Potentialanalyse (vgl. Kapitel 5.2)
- Beschreibung möglicher Kopplungsprozesse (vgl. Kapitel 5.4)

Phase 3 – Anlagennutzung (N):

Phase 3 nimmt den Betrieb und damit auch die dynamischen Einflüsse eines Prozesses ins Blickfeld. Ob die einzelnen Prozesse während der Bereitschaftszustandes abgeschaltet werden, ist zunächst auf die produktionsseitige Möglichkeit hin zu bewerten. Als Beispiel kann ein Rührwerk eines Tankes dienen, welches für weiße Schokolade mit einer höheren Taktung betrieben werden muss, um eine Sedimentierung der Phasen zu verhindern. Dunkle Schokolade hingegen neigt wegen anderer Zusammensetzung weniger stark zur Phasentrennung. Für dunkle Schokolade darf das Rührwerk seltener getaktet werden.

Ist die produktionsseitige Möglichkeit (Erlaubnis) des Abschaltens gegeben, muss die technische Möglichkeit geprüft und ggf. umgesetzt/geplant werden.

Die anschließende Schulung der Mitarbeiter soll einen nachhaltig optimalen Betrieb sicherstellen. Dabei zu berücksichtigen sind

- das Einstellen von Anlagenparametern (Taktzeiten, Temperatur- und Drucksollwerte),
- Parameter des Bereitschaftsbetriebes und
- Reduzierung von Leckageverlusten.

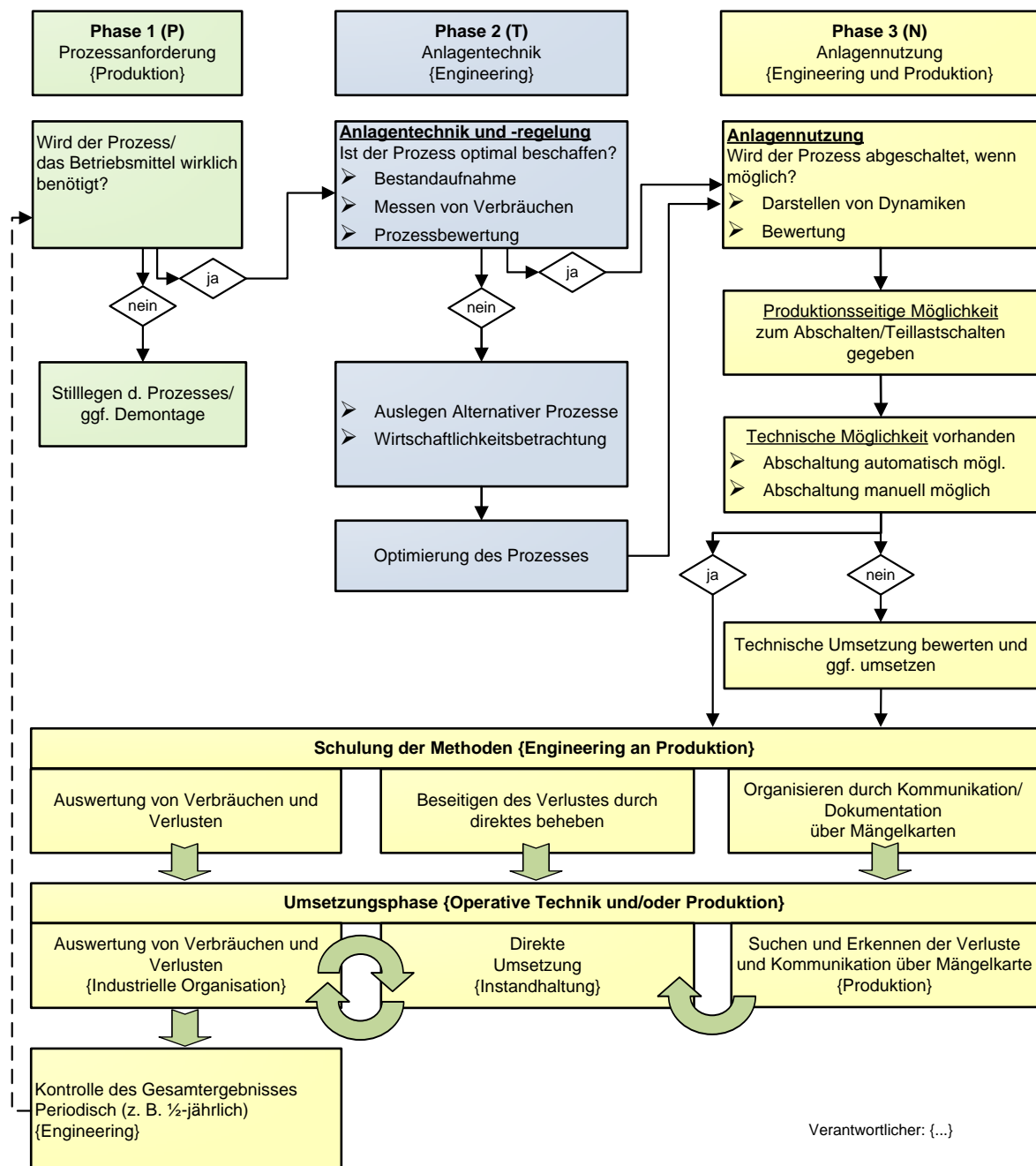


Abbildung 5-31: Handlungsanweisung zur systematischen Optimierung im Bestand

6 Validierung

Die entwickelten Systematiken werden an zwei Beispielen aus einer Fabrik, welche Schokoladenprodukte herstellt, validiert.

Am Beispiel des Werkwasserverbrauchs der Schokoladenfabrik werden folgende Systematiken veranschaulicht:

- Darstellen des Bestandsprozesses
- Aufstellen der Verlustkaskade unter Berücksichtigung des Physikalischen Optimums
- Ableiten der Handlungsmotivation
- Darstellung des dynamischen Verhaltens

Auf einen Schokoladenherstellungsprozess werden folgende Systematiken angewendet:

- Darstellen des Greenfieldprozesses mit dem Ziel zu veranschaulichen, was nach dem momentanen Stand der Technik den Verbrauch bedingt.
- Definition des Physikalischen Optimums auf Basis des Greenfieldprozesses.
- Gesamtbilanzierung der verschiedenen Energieformen (im Nennzustand)

Abbildung 6-1 zeigt die Prozesshierarchien der Fabrik und die Beispiele, anhand welcher die Validierung durchgeführt wird.

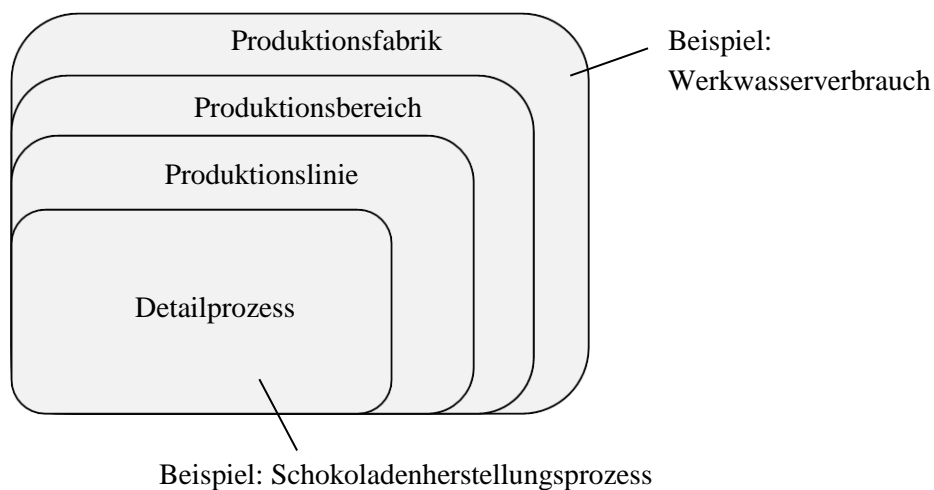


Abbildung 6-1: Prozesshierarchien der betrachteten Fabrik

6.1 Wasserverbrauch einer Fabrik

Der Werkwasserverbrauch der betrachteten Schokoladenfabrik wurde innerhalb von sechs Jahren um näherungsweise 60 % des ursprünglichen, produktspezifischen Wasserverbrauches reduziert.

6.1.1 Bestandsprozess

Anhand einer Messung wurde der Bestandsprozess (die Verbrauchssituation des Jahres 2007) ermittelt. Der Werkwasserverbrauch lag bei 195.269m³/a. Eine detaillierte Auswertung und Darstellung der Verbräuche zeigt Abbildung 6-2. Die Verbräuche verteilen sich auf die Bereiche Produktion, Services, Rückkühlwerk und Kesselhaus und werden in vier Kategorien farblich differenziert:

1. physikalisch optimaler Verbrauch (grün)
2. bereits optimierte Mengen (grau)
3. statische Verluste (rot)
4. dynamische Verluste (orange)

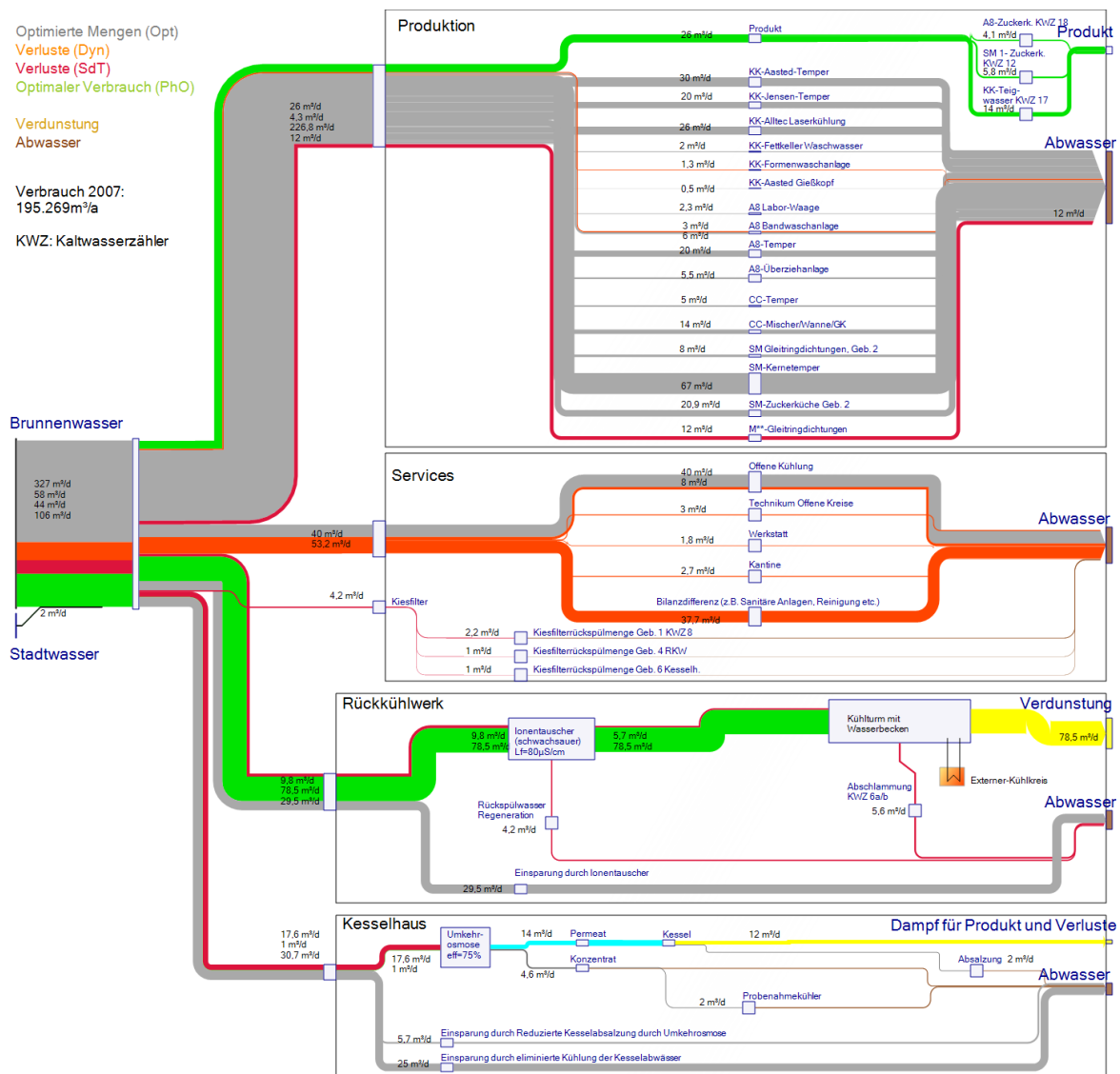


Abbildung 6-2: Sankey-Diagramm des Wasserverbrauchs einer Produktionsfabrik

Zu den in Abbildung 6-2 dargestellten Verbräuchen wird Folgendes angemerkt:

1. Grün dargestellte Mengen (PhO) stellen das Physikalische Optimum der Fabrik dar. Das Optimum begründet sich durch das Physikalische Optimum der einzelnen Bereiche:
 - a) Zur Herstellung des Produktes wird Wasser benötigt. Das Physikalische Optimum des Wasserverbrauches reiner Schokoladenherstellungsprozesse liegt, selbst wenn Reinigungsprozesse mitberücksichtigt werden, praktisch im vernachlässigbaren Bereich. Für andere Prozesse, beispielsweise Zucker-, Stärke- oder Farblöseprozesse; sowie die Teigherstellung ist ein Wasserverbrauch zu berücksichtigen. Die gemessenen Mengen werden als physikalisch optimal angenommen, weil die Rezepturen meistens soweit optimiert sind, dass die erforderlichen Wassermengen zur Herstellung von Produkten bis auf eine Nachkommastelle bekannt sind.
 - b) Das Rückkühlwerk wird im physikalischen Optimalfall nur mit der Menge an Wasser versorgt, welche verdunstet wird (siehe auch Kapitel 4.5.7 Rückkühlwerk). Dass die Verdunstungsmenge durch eine Reduktion des Kältebedarfes weiter reduziert werden kann, soll in der Wasserbilanz nicht betrachtet werden.
 - c) Das Kesselhaus wird nur mit der Wassermenge versorgt, welche in der Fabrik zur Direktdampfbefeuchtung erforderlich ist. Der physikalisch optimale Dampfkessel soll über den Verbrauch des zur Befeuchtung eingesetzten Direktdampfes hinaus mit 100 % Kondensatrücklauf betrieben werden.
2. Grau dargestellte Mengen (Opt) stellen die durch Effizienzprojekte bereits eingesparten Wassermengen dar.
3. Rot dargestellte Mengen (SdT) sind statische Verluste, die durch den verwendeten Stand der Technik bedingt sind. So benötigt das reale Rückkühlwerk mehr Wasser, als im physikalischen Optimalfall, um Salze abzuschlämmen. Im Kesselhaus ist keine 100%-ige Kondensatrückführung vorhanden. Eine Maßnahme, um dies zu erreichen, wäre beispielsweise die Phrasendampfkondensation.
4. Die dynamischen Verluste (Dyn) werden orange dargestellt. Vereinfacht angenommen resultieren in diesem Fall die dynamischen Verluste aus Reinigungsprozessen und der Bilanzdifferenz. Abbildung 6-2 zeigt eine detaillierte Darstellung der Ist-Situation. Dennoch kann nicht jeder einzelne Verbraucher durch Zähler erfasst werden, so dass die Bilanzdifferenz zum Hauptzähler durch „Sanitäre Einrichtungen und Sonstige“ dargestellt wird. In dieser Menge sind Prozesse enthalten, die noch Optimierungspotential aufweisen, jedoch nicht weiter betrachtet werden sollen.

Abbildung 6-3 zeigt die Pareto-Analyse der einzelnen Verbraucher (selbe Basis wie Abbildung 6-2). Der Vorteil ist die Sortierung der Verbraucher nach der Größe des Verbrauches. Inklusive der Bilanzdifferenz werden 25 Verbraucher (-gruppen) dargestellt. Die ersten vier Verbraucher machen (machten) über 50 % des Gesamtverbrauches aus.

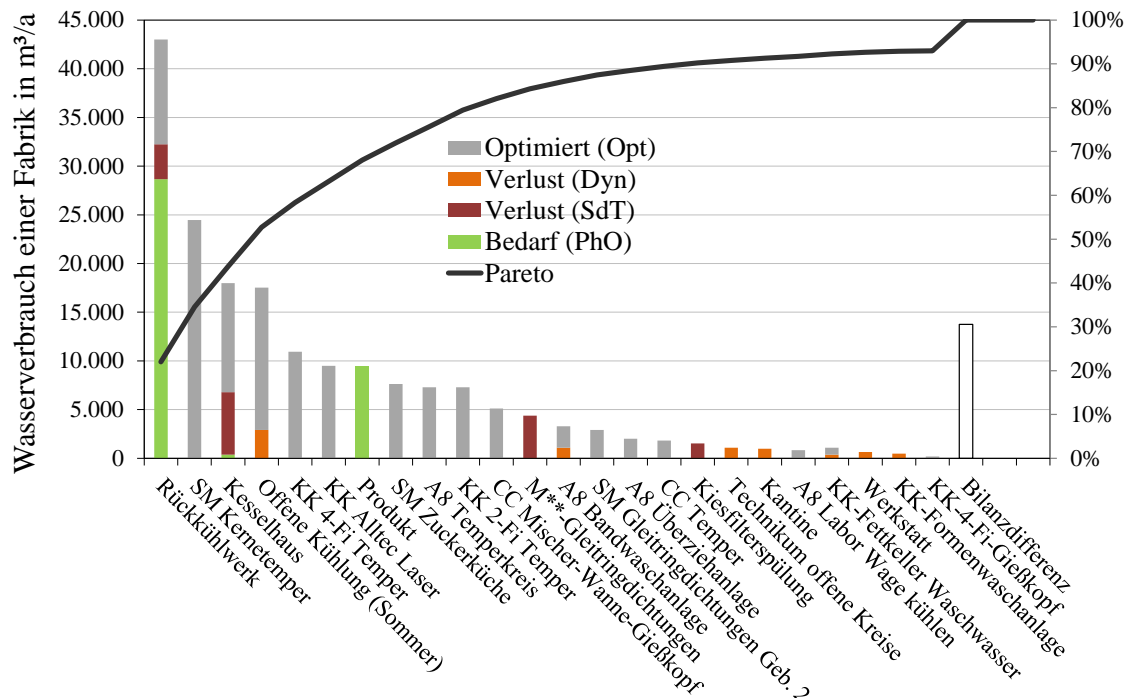


Abbildung 6-3: Pareto-Diagramm für den Wasserverbrauch einer Fabrik

6.1.2 Verlustkaskade und Physikalisches Optimum

Durch das Sortieren der Inhalte aus Abbildung 6-3 wird schließlich die Verlustkaskade gebildet. Abbildung 6-4 zeigt die Verbrauchssituation der Fabrik im Jahr 2007, welche als Brownfield beschrieben wird. Der produktionsmengenspezifische Verbrauch lag bei $3,1 \text{ m}^3_{\text{w}}/\text{tp}$. Durch Effizienzmaßnahmen in den Bereichen Rückkühlwerk, Kesselhaus, Kühlprozesse und Produktion konnte der Verbrauch auf $1,2 \text{ m}^3_{\text{w}}/\text{tp}$ gesenkt werden, was eine Reduktion von über 60 % im Vergleich zum Jahr 2007 bedeutet⁵⁷. Das erreichte Niveau kann als Greenfieldniveau bezeichnet werden, da eine neue Fabrik unter Berücksichtigung der verwendeten Anlagentechniken (wie beispielsweise Rückkühlwerk und Dampfkessel) einen ähnlichen Verbrauch aufweisen sollte.

⁵⁷ Die in Abbildung 6-4 eingesetzten $1,2 \text{ m}^3_{\text{w}}/\text{tp}$ zeigen den Verbrauch, welchen die Fabrik durch den optimierten Bestand theoretisch verbrauchen dürfte. Die Jahresbilanz 2013 liefert ein gemessenes Ergebnis von $1,34 \text{ m}^3_{\text{w}}/\text{tp}$, was eine Einsparung von nur 59 % bedeutet. Die Differenz ist dadurch begründet, dass einige Projekte 2013 fertiggestellt wurden und somit einen effektiven Übertrag in das Jahr 2014 mit sich bringen. Es wurde darüber hinaus vernachlässigt, dass sich die Produktionsmengen der Jahre 2007 und 2013 etwas unterscheiden.

Die Differenz zum Physikalischen Optimum stellen die dynamischen Verluste (Dyn) und die Verluste durch den eingesetzten Stand der Technik (SdT) dar. Das berechnete Physikalische Optimum⁵⁸ der Fabrik liegt bei $0,6 \text{ m}^3_{\text{w}}/\text{t}_\text{p}$.

Der PhO-Faktor der Fabrik konnte durch Effizienzmaßnahmen innerhalb von sechs Jahren vom Brownfieldniveau von 5,1 im Jahr 2007 auf das Greenfieldniveau von 2,0 im Jahr 2013 optimiert werden. Der PhO-Faktor des Greenfieldniveaus besagt, dass die optimierte Fabrik um den Faktor 2 mehr verbraucht als eine physikalisch optimale Fabrik.

Externe Kopplungsprozesse (EKP) werden in diesem Beispiel nicht weiter betrachtet.

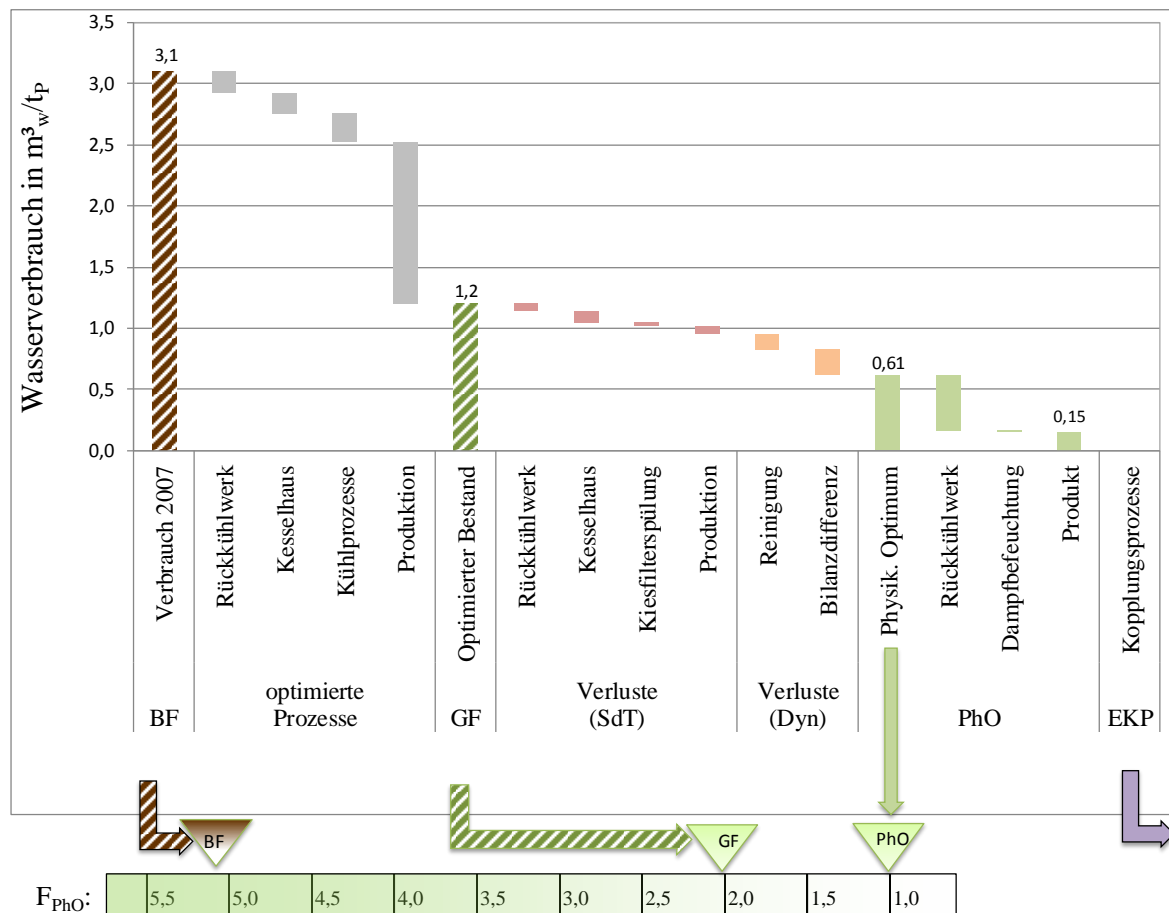


Abbildung 6-4: Verlustkaskade für den Werkwasserverbrauch einer Fabrik

⁵⁸ Das Physikalische Optimum wurde näherungsweise auf Basis der Produktionsmengen des Jahres 2013 berechnet. Dadurch, dass Jahresergebnisse vorgestellt werden, entsprechen die Ergebnisse nicht dem Nennzustand der Fabrik ($w_{\text{nutz}} \neq 1$).

6.1.3 Ableitung der Handlungsmotivation

Die Motivation, die Fabrik in weiteren Schritten mit Investitionsmaßnahmen noch effizienter zu gestalten, ist auf Grund der bereits umgesetzten Maßnahmen als gering einzustufen. Die Differenz zum Physikalischen Optimum ist erkennbar relativ gering.

Das Kesselhaus, welches momentan das Werk mit 180-°C-Wasserdampf versorgt, kann durch einen Alternativ-Prozess, zum Beispiel Heißwasserkessel in Verbindung mit einer Kraft-Wärme-Kopplung, ersetzt werden. Dies würde die Speisewassermengen des Kessels eliminieren. Weitere unbekannte Alternativprozesse könnten innerhalb der Bilanzdifferenz vorhanden sein.

Externe Kopplungsprozesse mit Bezug zur Ressource Wasser erscheinen auf den ersten Blick als nicht zweckmäßig und werden nicht weiter betrachtet.

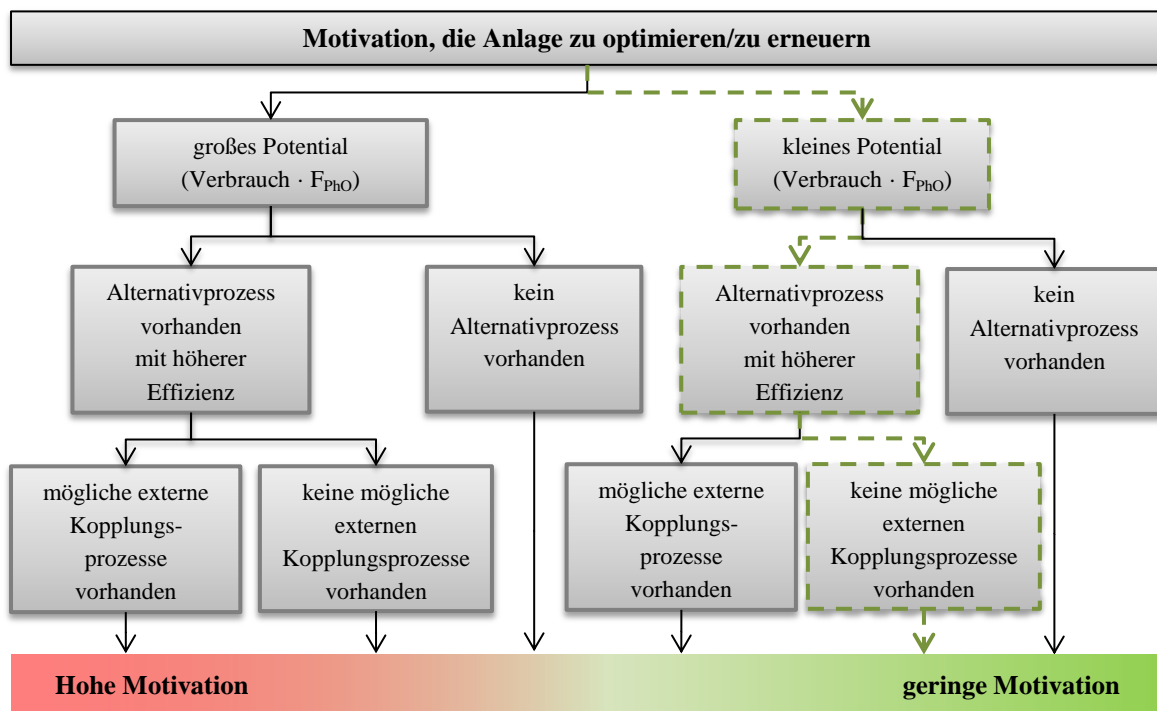


Abbildung 6-5: Handlungsmotivation nach der Optimierung (Zustand: 2013)

6.1.4 Untersuchung des dynamischen Verhaltens

Um die Fabrik auf ihr dynamisches Verhalten zu untersuchen, wurde die Systematik des normierten Aufwands (vgl. Kapitel 5.5) angewendet. Der witterungsabhängige Verbraucher – in diesem Fall das Rückkühlwerk – musste hierfür ausbalanciert werden, da dieser im Sommer einen zur Produktionsleistung überproportional großen Verbrauch aufweist⁵⁹.

Die Normierung wurde mittels der Produktionsnennleistung m_{PN} vorgenommen. Diese Leistung wurde in der produktionsstärksten Woche des Jahres 2013 ermittelt.

Abbildung 6-6 zeigt den normierten Wasserverbrauch der Fabrik für die Jahre 2008 und 2013⁶⁰. Der Bereitschaftsverlust (bei einer Produktionsmenge von 0 Tonnen) hat sich durch die Effizienzmaßnahmen von $6,3 \text{ m}^3_{\text{W}}/\text{h}$ auf $1,2 \text{ m}^3_{\text{W}}/\text{h}$ reduziert. Der Nennwirkungsgrad der Fabrik ist von $0,5 \text{ t}_{\text{PN}}/\text{m}^3_{\text{W}}$ auf $1,4 \text{ t}_{\text{PN}}/\text{m}^3_{\text{W}}$ erhöht worden. Zur Veranschaulichung und Kontrolle zeigt das Modell den Jahresnutzungsgrad. Dieser ist von $0,49 \text{ t}_{\text{P}}/\text{m}^3_{\text{W}}$ auf $1,31 \text{ t}_{\text{P}}/\text{m}^3_{\text{W}}$ gestiegen.

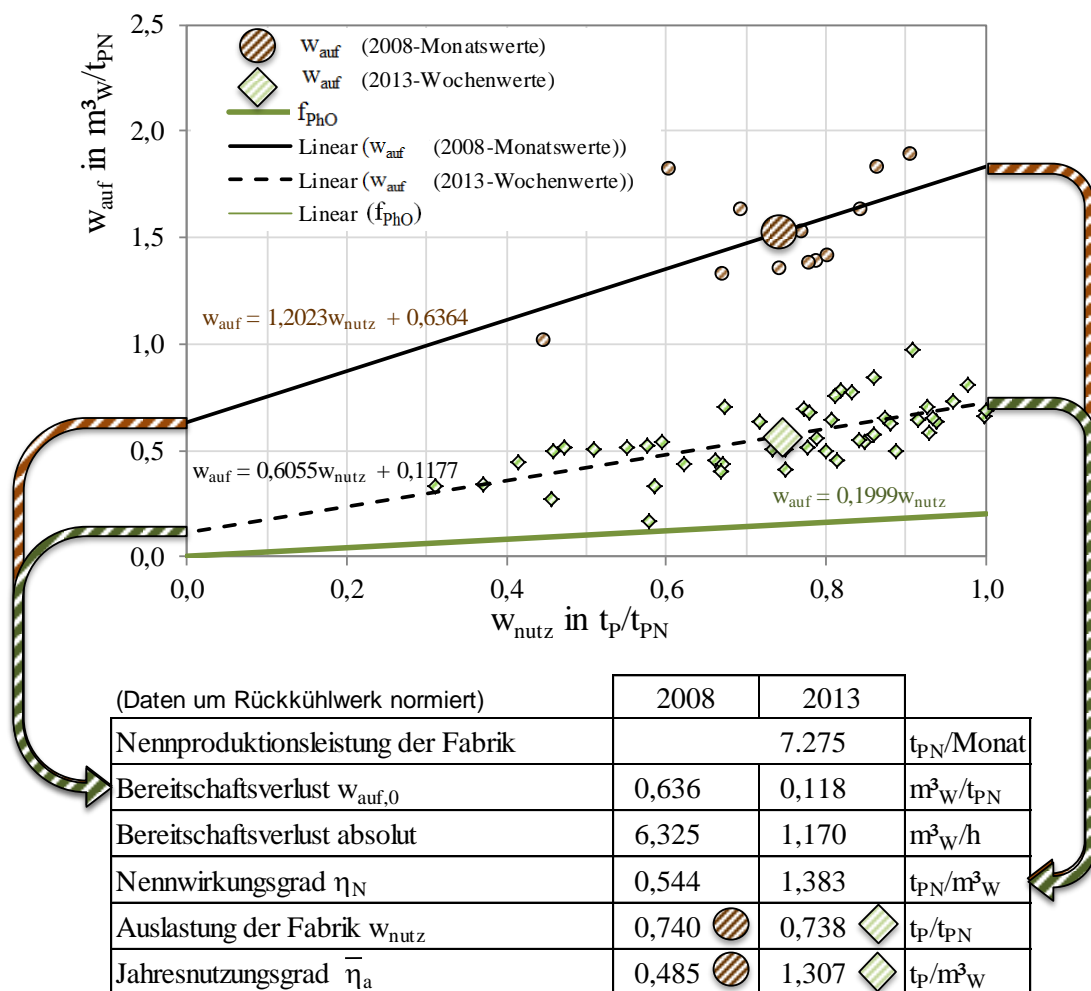


Abbildung 6-6: Dynamische Darstellung des Wasserverbrauchs einer Fabrik

⁵⁹ Aus diesem Grund ist die dynamische Darstellung – auch für den Jahresnutzungsgrad – nicht direkt mit der Verlustkaskade (vgl. Abbildung 6-4) zu vergleichen, in welcher das Rückkühlwerk mitbilanziert wurde.

⁶⁰ Das Jahr 2008 musste anstatt des Jahres 2007 gewählt werden, weil 2007 noch keine Messwerte auf Monatsbasis vorlagen. Für 2013 konnten sogar Messwerte auf Wochenbasis verwendet werden, was die Qualität in Bezug auf die Auflösung erhöht.

Abbildung 6-7 zeigt den optimierten Bestand, das Potential im Hinblick auf das Physikalische Optimum und das Physikalische Optimum selbst.

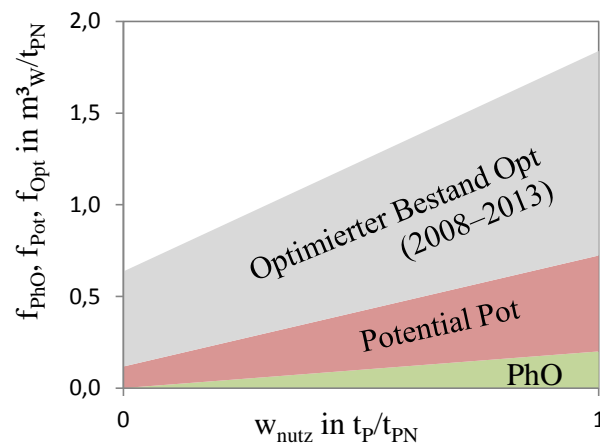


Abbildung 6-7: Optimierung und Potential des Wasserverbrauchs einer Fabrik

Abbildung 6-8 veranschaulicht den produktionsspezifischen Wasserbedarf (die Aufwandszahl e) in Abhängigkeit von der Produktionsleistung. Zu erkennen ist die Hyperbelfunktion, welche für geringe Produktionsmengen gegen unendlich strebt.

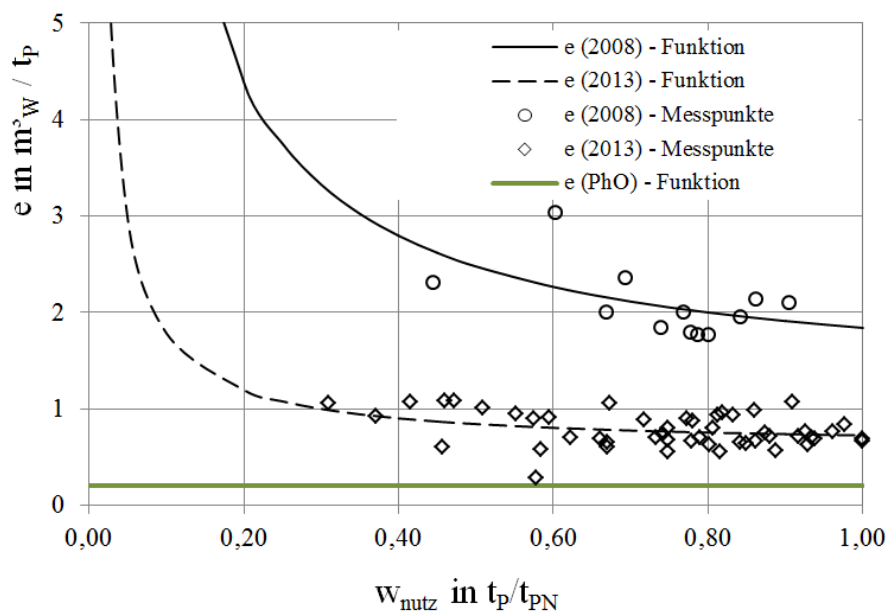


Abbildung 6-8: Dynamischer Wasserverbrauch einer Fabrik (Aufwandszahl)⁶¹

Der Nutzungsgrad in Abhängigkeit von der Produktionsleistung kann dem Anhang (Seite 118) entnommen werden.

⁶¹ Die Funktionen aus Abbildung 6-8 konnten über die einfache Bestimmung der linearen Funktion aus Abbildung 6-6 über Gl 5-16 berechnet werden und somit in einer hohen Qualität – insbesondere für den Bereich der geringen Auslastung – dargestellt werden.

6.2 Herstellprozess eines Produktes

In diesem Unterkapitel wird der Herstellprozess eines Schokoladenproduktes unter Verwendung der Systematiken dieser Arbeit betrachtet.

Das Schokoladenprodukt wurde bis zu der Erneuerung des Herstellprozesses im Jahre 2013 mit einer Gießmaschine hergestellt. Dieser Prozess ist im Anhang (Seite 120) grob beschrieben, soll jedoch hier nicht weiter betrachtet werden.

6.2.1 Beschreibung des Herstellprozesses

Der neue Prozess wird mittels eines Portionierers betrieben und gilt zum Zeitpunkt dieser Betrachtung als Stand der Technik. Er wird unter Berücksichtigung weiterer Prozesse (vgl. Abbildung 6-9) in Bezug auf das Physikalische Optimum untersucht. Da zur Herstellung des Schokoladenproduktes mehrere Technische Medien eingesetzt werden, wird die Systematik aus Kapitel 5.3 (Bilanzierung unterschiedlicher Energieformen) verwendet.

Der Gesamtprozess, dargestellt in Abbildung 6-9, umfasst die folgenden wesentlichen Prozessschritte:

- | | |
|-------------------|--|
| Pumpe: | Die Pumpe fördert flüssige Schokolade aus einem Tank zu den nachfolgenden Prozessen. |
| Temper: | Der Temper hat die Aufgabe, die Schokolade durch die Abkühlung teils zu kristallisieren. Die eigentliche Kristallisation der Schokolade findet im Kühltunnel bzw. in der Lagerung des Schokoladenfertigerzeugnisses statt. Die Erwärmung und Kühlung der flüssigen Schokolade kann vereinfacht nur unter Berücksichtigung der sensiblen Wärmeenergie berechnet werden. ⁶² |
| Mischer: | Der Mischer mischt die Schokolade mit den Feststoffen (Cornflakes und Mandeln). |
| Portionierer: | Der Portionierer portioniert das Schokoladen-Feststoff-Gemisch auf das Kühlband, auf welchem das Schokoladenprodukt (innerhalb eines Kühltunnels) erstarrt. Die Bilanzgrenze der Betrachtung dieser Arbeit ist der Austritt aus dem Portionierer. |
| Dekristallisator: | Ein Dekristallisator hat in der Schokoladenherstellung die Aufgabe, durch Wärmezufuhr vorkristallisierte Schokolade wieder aufzuschmelzen. Kristalle werden dadurch abgebaut. Die dekristallisierte Schokolade wird im Tank zur Wiederverwendung gelagert. Im physikalischen Optimalfall wird die Dekristallisation nicht betrachtet. |
| Tank: | Ein Tank dient zur Speicherung von flüssiger Schokolade. Zur Sicherstellung einer homogenen Phase werden darin Rührwerke verwendet. Im physikalischen Optimalfall werden der Tank und der Rührwerksbetrieb nicht betrachtet. |

⁶² Latente Wärmeenergie ist infolge einer Teilkristallisation von etwa 3 % vorhanden. [48]

Die Technischen Medien

- Heizung (rot markiert),
- Kälte (blau markiert),
- elektrische Energie (gelb markiert) und
- Druckluft (grau markiert)

sind über die Hauptversorgungsleitungen messtechnisch erfasst. Der Druckluftverbrauch wird in der weiteren Untersuchung nicht betrachtet.

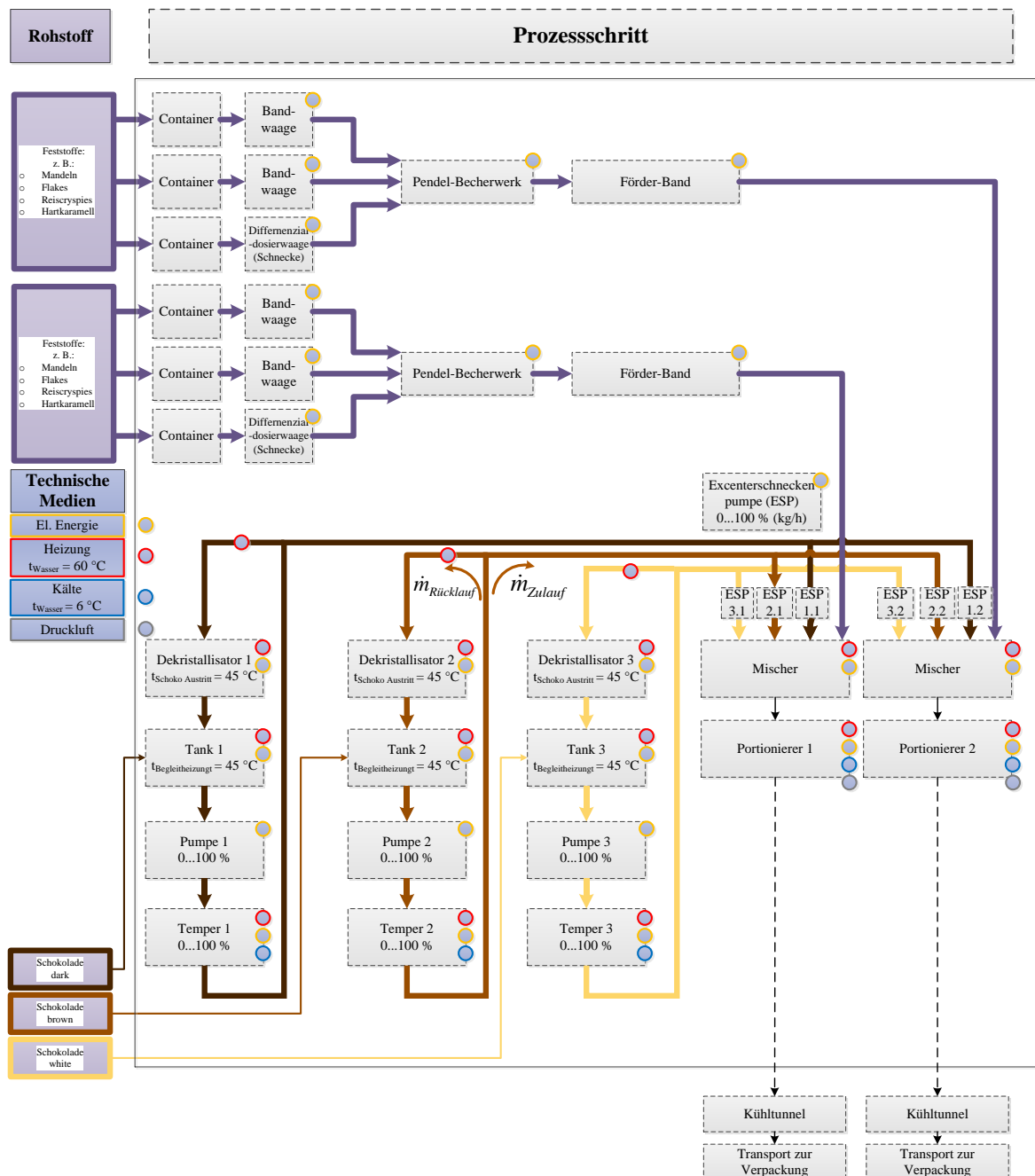


Abbildung 6-9: Prozessfließbild eines Schokoladenherstellprozesses – Portionierer

Die Anlage ist flexibel in Bezug auf die Betriebsvarianten. So kann beispielsweise eine Einzellinie betrieben werden oder auch auf beiden Linien eine Schokoladensorte gefahren. Ebenso ist es möglich, beide Linien mit unterschiedlichen Schokoladensorten zu beschicken.

Die Untersuchungen wurden für die Produktvariante „brown“ (Milchschokolade) durchgeführt. Jeweils beide Mischer und Portionierer waren in Betrieb.

Die Nennleistung einer Anlage (laut Herstellerangaben) entspricht

$$60 \frac{\text{Takte}}{\text{min}} \cdot 5 \frac{\text{g}}{\text{Portion}} \cdot 27 \text{ Reihen} = 1.620 \frac{\text{Portionen}}{\text{min}} = 8,10 \frac{\text{kg}}{\text{min}} = 486 \frac{\text{kg}}{\text{h}}.$$

Die Anlage (eine Linie) ist tatsächlich auf $58 \frac{\text{Takte}}{\text{min}} = 470 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ eingestellt. Dieser Wert soll als Nennleistung der Anlage für die Berechnung dienen.

Dieses Kapitel bezieht sich auf den Nennzustand der Linie. Im Anhang (Seite 129 und 130) wird ergänzend der dynamische Betrieb behandelt.

6.2.2 Beschreibung des physikalisch optimalen Prozesses

Der physikalisch optimale Herstellprozess wird auf Basis von Abbildung 6-9 in Tabelle 6-1 beschrieben. Wenn hier von adiabat gesprochen wird, ist damit gemeint, dass das System zur Umgebung physikalisch optimal isoliert ist. Wird Schokolade gekühlt oder erwärmt, geschieht dies innerhalb von Wärmeübertragern welche zur Umgebung ebenfalls als adiabat betrachtet werden. Innerhalb des Wärmeübertragers findet der Wärmetransport statt (vgl. auch Kapitel 4.5.2).

Tabelle 6-1: Das Physikalische Optimum des Schokoladenherstellprozesses

Prozessschritt		Physikalischer Aufwand PhO
0 → 1	Schokolade wird mit einer Temperatur von 45 °C aus dem Tank zum Temper gepumpt.	geschlossene, reibungsfreie Rohrleitungen, adiabat → kein Energieaufwand
1 → 2	Abkühlen der Schokolade (von 45 °C auf 33 °C)	geschlossene, reibungsfreie Rohrleitungen, adiabat, Kristallbildung in der Schokolade wird vernachlässigt → nur sensible Wärmeabfuhr
2 → 3	Abkühlen der Schokolade (von 33 °C auf 29,5 °C)	geschlossene, reibungsfreie Rohrleitungen, adiabat, Kristallbildung in der Schokolade wird vernachlässigt → nur sensible Wärmeabfuhr
3 → 4	Erwärmen der Schokolade (von 29,5 °C auf 30,5 °C)	geschlossene, reibungsfreie Rohrleitungen, adiabat, Kristallbildung in der Schokolade wird vernachlässigt → nur sensible Wärmezufuhr
4 → 5	Transport der Schokolade in begleitbeheiztem Rohr	geschlossene, reibungsfreie Rohrleitungen, adiabat → kein Energieaufwand
5 → 6	Schokolade wird mit Pumpe in Mischer befördert	geschlossene, reibungsfreie Rohrleitungen, adiabat → kein Energieaufwand
6* → 7*	Feststoffzufuhr (Cornflakes und Mandeln)	potentielle Energie wird zugeführt, da die Zufuhr auf einem höheren geodätischen Niveau liegt
6 → 7	Mischen von Feststoffen (Cornflakes und Mandeln)	Vernachlässigung der Reibung, adiabates System → kein Energieaufwand
7 → 8	Portionieren der Schokoladenpraline auf das Kühlband	Vernachlässigung der Reibung, adiabates System → kein Energieaufwand
8 → 9	Kühlen (Erstarren) der Schokoladenpraline	wird nicht betrachtet (dieser Prozessschritt dient nur der Veranschaulichung)

Abbildung 6-10 zeigt die Temperatur der Schokolade (ab Prozessschritt 6 des Schokoladen-Feststoff-Gemisches) innerhalb der einzelnen Prozessstufen für den physikalischen Optimalfall.

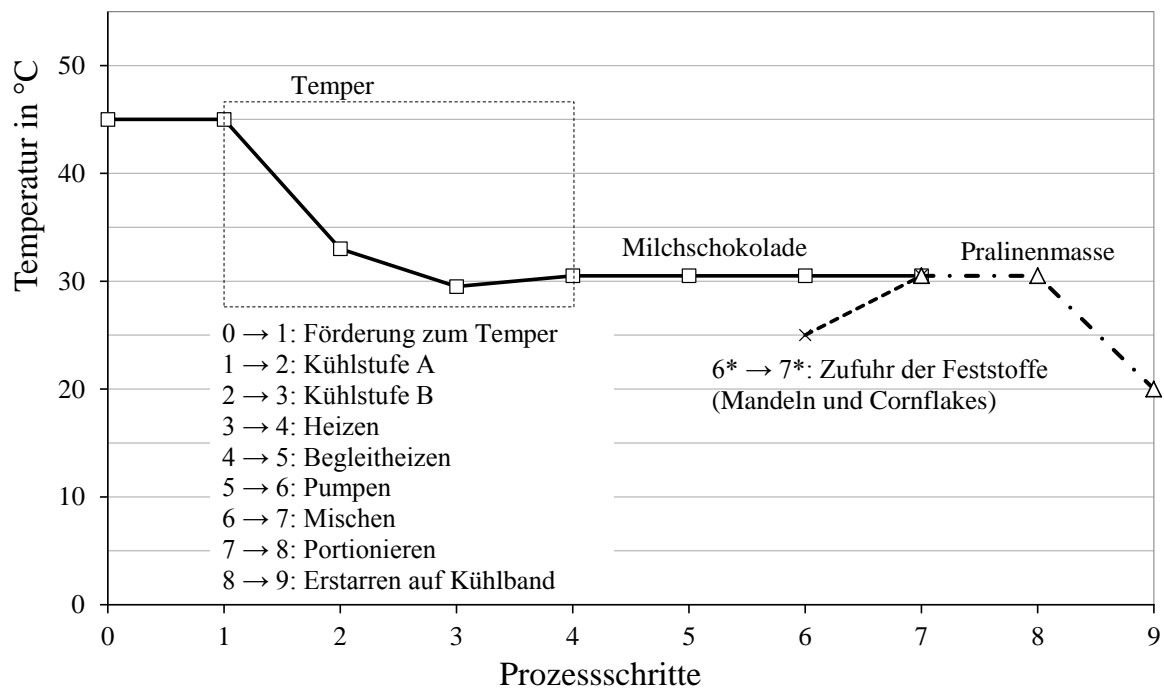


Abbildung 6-10: Prozessschritte des physikalisch optimalen Herstellprozesses⁶³

⁶³ Die Temperaturangaben (Sollwerte) wurden von den Anlagenfahrern an der Produktionslinie mitgeteilt und sollen als optimal betrachtet werden.

6.2.3 Gesamtbilanzierung der verschiedenen Energieformen

Der reale Energieverbrauch des betrachteten Schokoladenherstellprozesses liegt höher als der physikalische Optimalverbrauch. Abbildung 6-11 zeigt auf Basis der Systematik aus Kapitel 5.3 (Bilanzierung unterschiedlicher Energieformen) den produktionsspezifischen Primärenergiebedarf zur Herstellung des Schokoladenproduktes in kWh / t_{PN}. Das Physikalische Optimum ist auf Basis von Tabelle 6-1 berechnet worden. Die detaillierte Berechnung kann dem Anhang (Seite 117) entnommen werden.

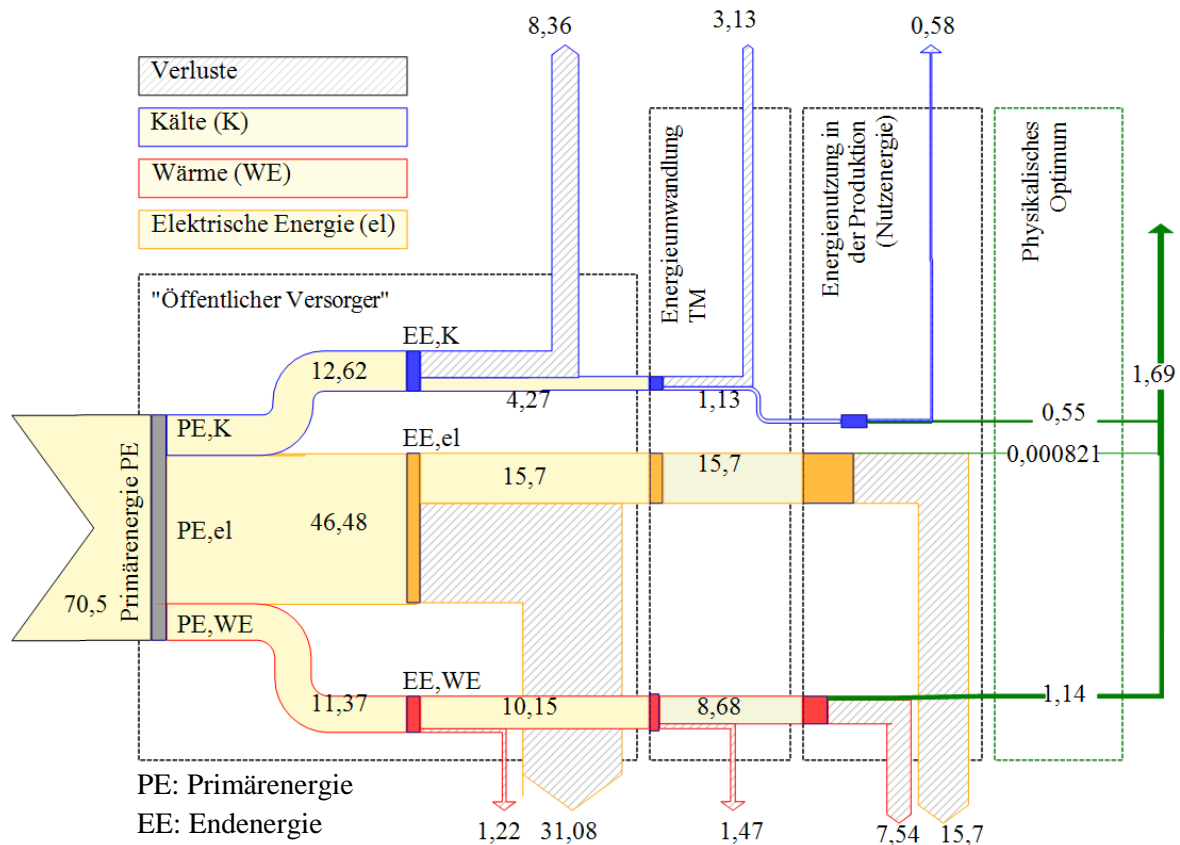


Abbildung 6-11: Erweiterte Verlustkaskade des Produktionsprozesses (Einheit: kWh / t_{PN})

Die Energie wird nach Umwandlungs- und Transportprozessen durch den öffentlichen Versorger als Endenergie an das Werk geliefert.

Im Werk erfahren die Energien durch Umwandlungsprozesse innerhalb der Technischen Medien Verluste.

Die Nutzenergie wird durch die Technischen Medien an den Produktionsprozess geliefert. Hier wird die Nutzenergie differenziert nach physikalisch nötigem Anteil und Verlustanteil dargestellt.

Der PhO-Faktor nach Gl 5-8 für den Gesamtprozess nach Abbildung 6-11 beträgt⁶⁴ 41,7.

⁶⁴ $F_{\text{PhO,PE}}^* = \frac{V_{\text{PE}}}{V_{\text{PhO}}} = \frac{70,5}{1,69} = 41,7 \frac{\text{kWh}_{\text{PE}}}{\text{kWh}_{\text{PhO}}}$

6.2.4 Bewertung des Ergebnisses und Ansatz zur Optimierung

Ansätze zur Optimierung – mit dem Ziel, den Gesamt-PhO-Faktor zu verkleinern – lassen sich Abbildung 6-11 entnehmen. Je größer die Verluste, desto größer ist das Potential, den Gesamt-PhO-Faktor (nach Gl 5-6) zu verkleinern.

Tabelle 6-2 zeigt die Verlustfaktoren der einzelnen Umwandlungsschritte, welche in Verbindung mit dem Verbrauch den Gesamt-PhO-Faktor von $F_{\text{PhO,PE}}^* = 41,7$ begründen.

Tabelle 6-2: Verlustfaktoren des Schokoladenherstellprozesses

		Wärme	Kälte	elektrische Energie
Öffentlicher Versorger	$F_{\text{PE,TM}}$	1,12	2,96	2,96
Technische Medien	$F_{\text{PhO,TM}}^{\text{TM}}$	1,17	3,77	1
Produktionsprozess	$F_{\text{PhO,TM}}^{\text{P}}$	7,593	2,068	19.128

6.2.4.1 Verluste innerhalb der öffentlichen Versorgung

Die Primärenergiefaktoren für Kälte als Technisches Medium (indirekt ist hier elektrische Energie gemeint) und elektrische Energie sind mit 2,96 höher als der Primärenergiefaktor für Wärme (Erdgas). Eine Optimierungsmaßnahme könnte die Kopplung von Kraft und Wärme (durch ein Blockheizkraftwerk) sein.

6.2.4.2 Verluste innerhalb der Technischen Medienerzeugung

Der PhO-Faktor der Energieumwandlung in der Technischen Medienerzeugung ist insbesondere für die Kälteerzeugung (3,77) im Vergleich zur Wärmeerzeugung (1,17) und zur Erzeugung der elektrischen Energie (1) hoch. Daraus ergibt sich, dass die PhO-Faktoren unterschiedlicher Prozesse nicht direkt miteinander verglichen werden können. Vielmehr könnte an dieser Stelle ein Benchmarking der einzelnen Technischen Medien hilfreich sein.

6.2.4.3 Verluste innerhalb des Produktionsprozesses

Der PhO-Faktor für den Produktionsprozess ist für die elektrische Energie (19.126) am höchsten. Die Begründung liegt darin, dass nur die geodätische Höhenänderung der Feststoffe unter physikalisch optimalen Bedingungen berechnet wurde. Weiterhin wurden sämtliche reibungsbehafteten Prozesse (wie Strömungs- und Mischvorgänge) im physikalischen Optimalfall mit einem Energieverbrauch von null bewertet. Es wird deutlich, dass verschiedene Prozesse nicht einfach miteinander verglichen werden können.

Der PhO-Faktor für die Kältenutzung (2,068) ist im Vergleich zum PhO-Faktor für die Wärmeversorgung (7,593) klein, was möglicherweise darin begründet ist, dass bei den „kälteverbrauchenden“ Prozessen nur geringe Oberflächenverluste an den Produktionsprozessen und den Verteilungsrohrleitungen vorliegen.

Das gleiche Argument würde für den höheren PhO-Faktor der Wärmeversorgung (7,593) passen. Das Wärmeversorgungsnetz – unter Berücksichtigung der Begleitheizung aller Schokoladenleitungen – ist erheblich größer, was entsprechende Verluste mit sich bringt.

Eine weitere Untersuchung des dynamischen Betriebes (vgl. Seite 129 und 130 im Anhang) zeigt einen erheblichen Anteil an Bereitschaftsverlusten. Für die thermischen Energien (Wärme und Kälte) lässt sich daraus ableiten, dass das größte Optimierungspotential in der „Adiabatisierung“ der Systeme (vgl. Kapitel 4.5.3) besteht.

6.2.4.4 Ansatz zur Optimierung

Die Anlage wurde nach dem „momentanen Stand der Technik“ gebaut, was zum Beispiel bedeutet:

- Einsatz „hocheffizienter“, drehzahl geregelter Pumpen
- Isolation aller Rohrleitungen
- Verwendung ausschließlich geschlossener Kühl- und Heizkreise

Somit bieten sich aus heutiger Sicht keine großen Optimierungspotentiale zur Steigerung der Energieeffizienz.

Für die weitere Optimierung des aktuellen Produktionsprozess in Bezug auf den Energieverbrauch sei an dieser Stelle jedoch auf einen effizienteren Temper der Fa. Aasted [1] verwiesen, welcher sich zum Zeitpunkt der Errichtung der Anlage als „noch nicht wirtschaftlich“ erwiesen hat.

Der Impf-Temper hat den Vorteil, dadurch energieeffizienter Schokolade zu kristallisieren, dass nur ein Teilmassenstrom der Schokolade thermisch behandelt (gekühlt) werden muss⁶⁵. Der gekühlte Teilmassenstrom wird dem Hauptmassenstrom anschließend wieder zuimpft.

Abbildung 6-12 zeigt das Funktionsprinzip des Impf-Tempers der Firma Aasted [1], welche den Standard-Temper der untersuchten Anlage zu einem späteren Zeitpunkt substituieren könnte.

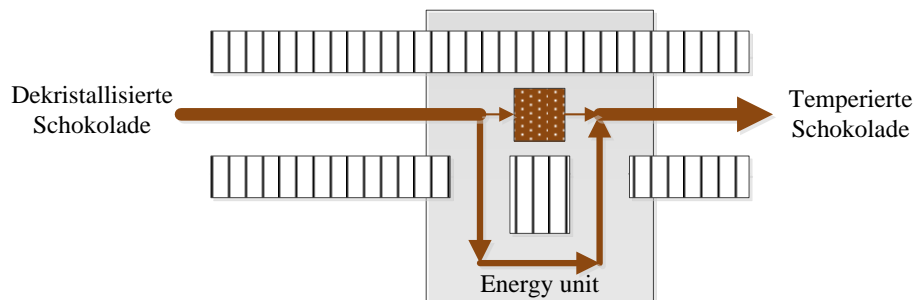


Abbildung 6-12: SuperNova Energy Temper (eigene Darstellung nach [1])

⁶⁵ Auf die konkrete Berechnung soll im Rahmen dieser Arbeit verzichtet werden. Detaillierte Unterlagen sind [1] zu entnehmen.

7 Schlussbetrachtung

7.1 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Definition eines ultimativen Referenzprozesses (Optimums) als Bewertungsgröße für technische Prozesse. Weiterhin sollten Systematiken zur Steigerung der Energie- und Stoffeffizienz im Hinblick auf dieses Optimum entwickelt bzw. weiterentwickelt werden.

Das Untersuchungsumfeld dieser Arbeit sind Produktionsprozesse in der Nahrungsmittelindustrie.

Der dokumentierte Stand der Wissenschaft zeigt zunächst die Vielfalt an definierten Referenzprozessen. Ebenso gibt es bereits Systematiken zur Energieeffizienzsteigerung und -bewertung, welche potentiell um das ultimative Optimum erweitert werden können.

In dieser Arbeit wird das „Physikalische Optimum“ PhO als idealer Referenzprozess zur Bewertung technischer Prozesse definiert und auf naturwissenschaftliche Probleme, primär im Bereich der Thermodynamik, angewendet. Der Vorteil, den realen Prozess mit dem Physikalischen Optimum zu vergleichen, liegt darin, dass der Referenzpunkt (das PhO) nicht unterschritten werden kann, solange die physikalischen Gesetze gelten. Somit ist ausgeschlossen, dass zu einem späteren Zeitpunkt, zu dem der Stand der Technik fortgeschritten ist, ein neuer Referenzpunkt bestimmt werden muss. Als Beispiel für diese Problematik seien die Effizienzklassen von Elektromotoren genannt, welche im Zuge des Technikfortschritts neu definiert werden mussten. Das Physikalische Optimum ist dagegen für einen bestimmten Prozess ultimat.

Eine wesentliche Anwendung des Physikalischen Optimums wird anhand der in dieser Arbeit entwickelten, erweiterten Verlustkaskade veranschaulicht. Das Physikalische Optimum, als letzter Schritt der Verlustkaskade, ist eine Erweiterung der gängigen, in der Literatur bekannten Darstellung (Primärenergie → Endenergie → Nutzenergie). Der physikalisch optimale Verbrauch ist der Teil der Nutzenergie, welcher unter physikalisch optimalen Bedingungen erforderlich ist. Der übrig bleibende Anteil der Nutzenergie ist dementsprechend jener Anteil, welcher nach den Randbedingungen der Physik als Verlust zu betrachten ist. Am Beispiel des Herstellprozesses eines Schokoladenproduktes wird die erweiterte Verlustkaskade validiert. Sie veranschaulicht alle auftretenden Verluste von der Primärenergie bis zum PhO. Eine Schwierigkeit ist hierbei, die Vergleichbarkeit aller unterschiedlichen Energieformen (Kälte, Druckluft, Wärme) herzustellen, und ein Gesamtbild darzustellen. Das Bilden einer äquivalenten Einheit löst dieses Problem.

Die in dieser Arbeit entwickelte Bewertungsgröße ist der PhO-Faktor, welcher das Verhältnis des realen Verbrauches zum physikalisch optimalen Verbrauch (Bedarf) darstellt. Der PhO-Faktor ist im physikalischen Optimalfall gleich eins. Im Rahmen der Validierung wird anhand einer Nahrungsmittelfabrik gezeigt, wie der Werkwasserverbrauch innerhalb von 6 Jahren um etwa 60 % reduziert werden konnte. Der PhO-Faktor verringert sich dadurch von 5,1 auf 2,0. Der PhO-Faktor der optimierten Fabrik von 2,0 zeigt das verbleibende, maximale Potential und die daraus abgeleitete geringe Handlungsmotivation, weitere Optimierungs-Schritte einzuleiten. Des Weiteren wird ein unter neuesten Gesichtspunkten errichteter Schokoladenherstellungsprozess untersucht. Der PhO-Faktor, ausgehend vom Primärenergieverbrauch bis hin zum PhO-Bedarf des Produktionsprozesses, ist 41,7. Dies zeigt den im Vergleich zum physikalisch optimalen Bedarf hohen Primärenergieverbrauch auf.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Bewertung des dynamischen Verhaltens produktionstechnischer Anlagen. Somit wird auch die Nutzungsphase eines Prozesses (instationärer Betrieb) bewertet. Die in dieser Arbeit entwickelte Systematik zur Bewertung des dynamischen Verhaltens liefert zwei wesentliche Ergebnisse:

1. Die Differenz des Physikalischen Optimums zum realen Verbrauch wird als Potential definiert und als Funktion der Prozessauslastung dargestellt. Darüber hinaus können auch bereits optimierte Verbräuche als Funktion dargestellt werden. Das Ergebnis ist eine übersichtliche Gesamtdarstellung des Physikalischen Optimums, der bereits optimierten Verbräuche sowie des verbleibenden Potentials für weitere Optimierungen unter dynamischen Gesichtspunkten. Die Darstellung reicht vom Bereitschaftsbetrieb bis hin zur Nennleistung des Prozesses.
2. Zur Darstellung und Bewertung der Effizienzsteigerung von Prozessen können die Verbräuche als Funktionen (vor und nach der Effizienzmaßnahme) miteinander verglichen werden. Die funktionale Bewertung von Verbräuchen hat den Vorteil, dass die Auslastung der Produktion keinen Einfluss mehr auf das Ergebnis und die abschließende Vergleichsbewertung hat. Zur Veranschaulichung wird in dieser Arbeit beispielhaft die dynamische Bewertung des Werkwasserverbrauchs durchgeführt. Das Ergebnis zeigt den ursprünglichen „hohen“ Werksverbrauch, den Verbrauch des optimierten Werkes und schließlich das Physikalische Optimum als Funktion über der Auslastung des Werkes.

7.2 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen das große Potential des Physikalischen Optimums als Bezugsreferenz. Darauf basierend können weitere vorhandene Systematiken und Effizienzkonzepte um das PhO erweitert werden. Beispielsweise werden in dieser Arbeit die Gebäudequalität sowie Witterungseinflüsse nicht betrachtet.

Die Bewertung dynamischer Verluste im Hinblick auf das Physikalische Optimum wird in dieser Arbeit als Systematik vorgestellt. Auf dieser Grundlage könnte ein für die Regelungstechnik relevanter Regelalgorithmus entwickelt werden. Aus dem Bereich der Klimatechnik sei als beispielhafte Basis die h-x-geführte Regelung erwähnt.

Es hat sich gezeigt, dass unterschiedliche Prozesse und deren PhO-Faktoren nicht einfach miteinander verglichen werden können. Hierfür wäre ein Benchmarking von PhO-Faktoren, insbesondere der einzelnen Technischen Medien, hilfreich. Dies könnte in Abhängigkeit wesentlicher physikalischer Einflussfaktoren geschehen. Als Beispiel sei für einen Kältemaschinenprozess die Verdampfungstemperatur als wesentliche physikalische Einflussgröße genannt.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Aasted: Produktunterlagen des Herstellers: SuperNova Energy Temper, Farum-Dänemark, (www.aasted.eu/en/chocolate/chocolate-machines/tempering-machines/supernova-energy).
- [2] Arbeitskreis „Maschinen und Anlagen in der Süßwarenindustrie“: Leitfaden Energieeffizienz in der Süßwarenindustrie. 2. Oktober 2009, (www.lebensmitteltechnik-online.de).
- [3] Atlas Copco: Handbuch der Drucklufttechnik. Essen, 2003.
- [4] BAEHR, H.D./STEPHAN, K.: Wärme und Stoffübertragung. 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- [5] BAUMANN, B.: Professor für Physik an der HAW Hamburg, Persönliche Mitteilung, 28. Januar 2014.
- [6] BINDING, H. J.: Grundlagen zur systematischen Reduzierung des Energie- und Materialeinsatzes. Dissertation, Aachen, 1988.
- [7] BRÄNZEL, J.: Einbindung eines Energiemanagementsystems nach DIN EN ISO 50001 in ein bestehendes Management-System. TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Vortrag DKN: Industriegipfel Energiemanagement München, 2012.
- [8] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Energiemanagementsysteme in der Praxis, ISO 50001: Leitfaden für Unternehmen und Organisationen. Berlin, Juni 2012.
- [9] CERBE, G.: Einführung in die Thermodynamik. 14. Aufl., Carl Hanser Verlag München Wien, 2005.
- [10] DIN EN 60034-30 (VDE 0530-30:2012-03): Wirkungsgrad-Klassifizierung von Drehstrommotoren mit Käfigläufern, ausgenommen polumschaltbare Motoren (IE-Code), gültiger Norm-Entwurf, 2012.
- [11] DIN EN ISO 14001: Umweltmanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung, Deutsche Fassung ISO 14001:2004.
- [12] DIN EN ISO 50001: Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung, Deutsche Fassung EN ISO 50001:2011.
- [13] DIN V 4701-Teil 10: Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen - Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung, August 2003.
- [14] DKV-Kältemaschinenregeln: DKV-Arbeitsblätter für die Wärme- und Kältetechnik. 8. Aufl., Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein, C.F.Müller Verlag Heidelberg, 2005.
- [15] DRUMM, C. / BUSCH, J. / DIETRICH, W. / EICKMANS, J. / JUPKE, A.: STRUCTese® – Energy efficiency management for the process industry. Bayer Technology Services GmbH, 51368 Leverkusen, Germany, Bayer MaterialScience AG, 51368 Leverkusen, Germany.
- [16] DRUMM, C.: Energy efficiency management for the process industry - Energieeffizienz-Management und -Benchmarking für die Prozessindustrie. Bundesministerium für Bildung und Forschung (http://www.chemieundco2.de/_media/10_EE_Management.pdf).

- [17] Energie Schweiz, Fraunhofer ISI: Infoblätter Druckluft, effiziente Druckluft. (www.druckluft.ch), Karlsruhe, September 2006.
- [18] EnEV: Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung. Bonn, 18.11.2013.
- [19] ENGELMANN, J.: Methoden und Werkzeuge zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Fabriken. Dissertation, Chemnitz: IBF, 2009.
- [20] ERLACH, K. / Westkämper E.: Energiewertstrom: der Weg zur energieeffizienten Fabrik. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2009.
- [21] Fraunhofer IPA: Total Energy Efficiency Management (TEEM), Energiemanagementsysteme – Leitfaden zur Umsetzung. Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Nobelstraße 12, D-70569 Stuttgart, Abteilung 110: Produkt- und Qualitätsmanagement (http://www.konstanz.ihk.de/linkableblob/knihk24/innovation/anlagen/992536/12./data/TEEM_D_04a_Leitfaden_EMS_final_090702-data.pdf).
- [22] Fraunhofer ISI: Infoblatt Thermodynamik, Druckluft effizient / Druckluft Schweiz. (www.druckluft-effizient.de), Karlsruhe, Juni 2006.
- [23] FRESNER, J. / Bürki, T. / Sittel, H. H.: Ressourceneffizienz in der Produktion: Kosten senken durch Cleaner Production. Düsseldorf: Symposium Publ., 2009.
- [24] FRESNER, J.: Zero Emission Retrofitting for Existing Textile Plants, Berichte aus Energie- und Umweltforschung 76/2010. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Radetzkystraße 2, 1030 Wien.
- [25] FRISCHKNECHT, R.: Primärenergiefaktoren von Energiesystemen. ESU-services Ltd., Bundesamt für Energie, BFE, Uster (CH), Juli 2002.
- [26] GRAHL, A.: Handbuch für betriebliches Energiemanagement: systematisch Energiekosten senken, Initiative Energie Effizienz Industrie & Gewerbe. Berlin: DENA, 2010.
- [27] GROßKLOS, M.: Kumulierter Energieaufwand und CO₂-Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger und -versorgungen. IWU – Institut für Wohnen und Umwelt, 2009.
- [28] HARTMANN, K.: Kreisprozessverbesserung durch Entspannungsturbine. Fa. Carrier, September 1994 (Sonderdruck aus der Fachzeitschrift Ki Luft- und Kältetechnik Heft 9/1994, 22. Jahrgang, Seite 421–424 C.F. Müller Verlag, Heidelberg).
- [29] HERING, E. / MARTIN, R. / STOHRER, M.: Physik für Ingenieure. Springer Verlag, 10. Auflage, 2007.
- [30] HERRMANN, C. / THIEDE, S. / HEINEMANN, T.: Ganzheitliche Ansätze zur Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz in der Produktion. TU-Braunschweig (http://www.progress-aluminium.de/files/914_Beitrag_Karlsruher_Arbeitsgespraeche_2010_22g3ug.pdf).
- [31] HESSELBACH, J.: Energie- und klimaeffiziente Produktion: Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012.
- [32] HEYL, P. / KRAUS, W.E et al: Transkritischer CO₂-Prozess mit arbeitsleistender Entspannung-Prozessgestaltung. konstruktive Lösungen, Anwendungen, TU-Dresden, Lehrstuhl für Kälte- und Kryotechnik.

- [33] JUKNA, S.: Crashkurs Mathematik für Informatiker. Teubner Verlag, 1. Auflage, 2008.
- [34] KOCH, R.: Das 80/20 Prinzip – Mehr Erfolg mit weniger Aufwand. Campus Verlag, 1997.
- [35] LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NRW - BREF-Dokumente, (<http://www.lanuv.nrw.de/anlagen/bref.htm>).
- [36] LASSELSBERGER, L.: Grundlagen der Verbrennungstechnik und technische Umsetzung. Bundesanstalt für Landtechnik BLT.
- [37] Linde AG (Hrsg.): 125 Jahr Linde – Eine Chronik, Wiesbaden.
- [38] MALONEY, S. K.: Selective brain cooling and the cranial arteriovenous temperature difference in free-ranging oryx (oryx gazelle). Department of Physiology, University of Western Australia, Perth, Australia.
- [39] MÜLLER, D.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [40] MUNDEL-JANSON, O.: Zertifizierung von Energiemanagementsystemen gemäß DIN EN ISO 50001. SHE Meeting Nestlé Deutschland (Persönliche Mitteilung), 14.03.2013, Mannheim.
- [41] PHYLIPSEN, G. J. M. / Blok, K. / Worrell, E.: International comparisons of energy efficiency: methodologies for the manufacturing industry. Energy policy. - Oxford: Elsevier, 1997, pages 715-725.
- [42] POHLMANN: Taschenbuch der Kältetechnik (Grundlagen, Anwendungen, Arbeitstabellen und Vorschriften). 20. Auflage, VDE-Verlag.
- [43] PÜSCHEL, F. W.: Energieeffizienz-Steigerungspotentiale in großen Anlagebeständen. Dissertation, Eul-Verlag, 2011.
- [44] RÄSCH, H: Kühlwasserseminar der Firma Nalco, Vortragsblock: *Kühlsysteme, Technik und Berechnungsgrundlagen*, Berlin, 16.-17.09.2009.
- [45] Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Angabe des Verbrauchs an Energie und anderen Ressourcen durch energieverbrauchsrelevante Produkte mittels einheitlicher Etiketten und Produktinformationen.
- [46] ROUVEL, L. / Deutscher, P.: Energetische Bewertung haustechnischer Anlagen – Der „normierte Energieaufwand“. HLH-Springer Verlag, Bd 54, Juli 2003.
- [47] SAHIN, S / SUMNU, S. G.: Physical Properties of Foods. Springer Science+Business Media, 2006.
- [48] SCHÄFER, Henning (Nestlé Deutschland AG): Technische Produktbetreuung/Technologie, Geschäftsbereich Confectionery, Nestlé Erzeugnisse GmbH, Lyoner Str. 23, 60523 Frankfurt/Main, Persönliche Mitteilung, 2014.
- [49] SOUCI, S. W. / FACHMANN, W. / KRAUT, H.: Die Zusammensetzung der Lebensmittel, Nährwert-Tabellen 1986/87. 3. Auflage, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart.
- [50] THIEDE, S.: Energy efficiency in manufacturing systems. Berlin: Springer, 2011.

- [51] THIEDE, S / BOGDANSKI, G / HERRMANN, C: A systematic method for increasing the energy and resource efficiency in manufacturing companies. Braunschweig, 2012.
- [52] THOLLANDER, P. / PALM, Jenny: Improving Energy Efficiency in Industrial Energy Systems: An Interdisciplinary Perspective on Barriers. Energy, Springer-Verlag London 2013.
- [53] TOLEDO, R. T.: Verfahrenstechnische Grundlagen der Lebensmittelproduktion. 1. Auflage, Behr's Verlag, 2004.
- [54] Unep: Fuels and Combustion, Energy Efficiency Guide for Industry in Asia. (www.energyefficiencyasia.org).
- [55] Volta, D.: Biomassefeuerungen - Regelungstechnische Maßnahmen zur Prozessoptimierung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. VDM-Verlag, Mai 2008.
- [56] Volta, D.: Erprobung der Brennwerttechnik an einem Holzpelletkessel. Studienarbeit im Masterstudiengang „Technische Unternehmensführung“ Fachhochschule Braunschweig Wolfenbüttel, 2006.
- [57] WAIDE, P. / BRUNNER, C. U.: Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems – Working Paper. International Energy Agency, 2011.
- [58] WOLFF Prof. Dr. Dieter: Persönliche Mitteilung innerhalb der Vorlesung „Heizungstechnik“, Fachhochschule Braunschweig Wolfenbüttel, Fachbereich Versorgungstechnik, 2007.
- [59] WOSNITZA, F. / HILGERS, H. G.: Energieeffizienz und Energiemanagement - Ein Überblick heutiger Möglichkeiten und Notwendigkeiten. Vieweg+Teubner Verlag Springer Fachmedien Wiesbaden, 2012.

In dieser Arbeit wird nach der Vancouver Konvention (Nummern-Stil) zitiert.

„Eigene Darstellung nach [X]“ bedeutet, dass der Inhalt einer Darstellung innerhalb einer eigenen Abbildung reproduziert wird.

„Eigene Darstellungen modifiziert nach [X]“ bedeutet, dass der Inhalt einer Darstellung innerhalb einer eigenen Abbildung reproduziert wird und zudem verändert bzw. ergänzt wird.

A 2 Bewertung der Technischen Medien

A 2.1 Kälteerzeugung

Die Bilanzierung der messtechnisch erfassten Kälteversorgungseinheit soll beispielhaft die Berechnung zeigen. Die berechneten Ergebnisse sind darüber hinaus Bestandteil der Validierung in Kapitel 6.2.

Die Messung wurde an einem ammoniakbetriebenen Schraubenverdichter-Aggregat durchgeführt. Alle gemessenen Werte wurden innerhalb des Teillastbetriebes gemessen. Der dynamische Einfluss wird vernachlässigt.⁶⁶

In diesem Beispiel wird die physikalisch optimale Antriebsleistung P_C für den Kältemaschinenprozess nach Gl 4-27 berechnet:

$$P_C = \frac{\dot{Q}_0}{\varepsilon_{KC}} = \frac{\dot{Q}_0}{\frac{T_0}{T_c - T_0}} = \frac{844 \text{ kW}}{\frac{(273,15 + 3) \text{ K}}{(30 - 3) \text{ K}}} = \frac{844 \text{ kW}}{10,23} = 82,5 \text{ kW}$$

Nach Gl 4-28 wird ein Teil der Antriebsleistung für Temperaturdifferenz zur Wärmeübertragung im Wärmeübertrager aufgewendet. Der Verlust P_{verl}^z beträgt

$$P_{\text{verl}}^z = P_C \cdot \frac{(T_v - T_0)}{(T_c - T_0)} = 82,5 \text{ kW} \cdot \frac{(6 - 3)}{(30 - 3)} = 82,5 \text{ kW} \cdot 0,111 = 9,2 \text{ kW}$$

⁶⁶ Gemessen wurden die Größen $t_0 = 3 \text{ °C}$, $t_v = 6 \text{ °C}$, $t_c = 30 \text{ °C}$, $P_{\text{el}}^V = 234 \text{ kW}$, $P_{\text{el}}^{\text{BM}} = 42,2 \text{ kW}$ sowie $\dot{Q}_0 = 844 \text{ kW}$. Die Kälteleistung wurde über einen Volumenstromzähler und zwei Temperaturfühler (im Vor- und Rücklauf) des Kühlmittelstromes gemessen und berechnet. Wärmeverluste zur Umgebung des Wärmeübertragers wurden vernachlässigt. Die Messung fand unter dynamischen Bedingungen (Teillastbetrieb) statt, was für die Nutzung der Ergebnisse in der weiterführenden Ausarbeitung nicht weiter berücksichtigt wurde.

A 2.2 Wärmeerzeugung

Die wärmetechnische Versorgung der Fabrik ist mittels eines Dampfkessels realisiert. Dem Dampfkessel ist ein Abgaswärmetauscher (Economiser) nachgeschaltet, welcher durch einen internen Kopplungsprozess die Abgastemperatur nutzbringend von 200 °C auf 115 °C abkühlt⁶⁷. Nach [9] kann die Luftzahl näherungsweise durch die gemessene Sauerstoffkonzentration im Abgas O_2^a berechnet werden. Die mittlere, gemessene Sauerstoffkonzentration im Abgas beträgt $O_2^a = 2,2 \%$.

$$\lambda \approx \frac{0,21}{0,21 - O_2^a} = \frac{0,21}{0,21 - 0,022} = 1,117$$

Gl A 2.1

Die Steigerung des Feuerungstechnischen Wirkungsgrades liegt durch den Economiser-Betrieb bei 3,5 Prozentpunkten. Der Abgasverlust nach dem Economiser ist 13,7 % (nach Abbildung A 2.1).

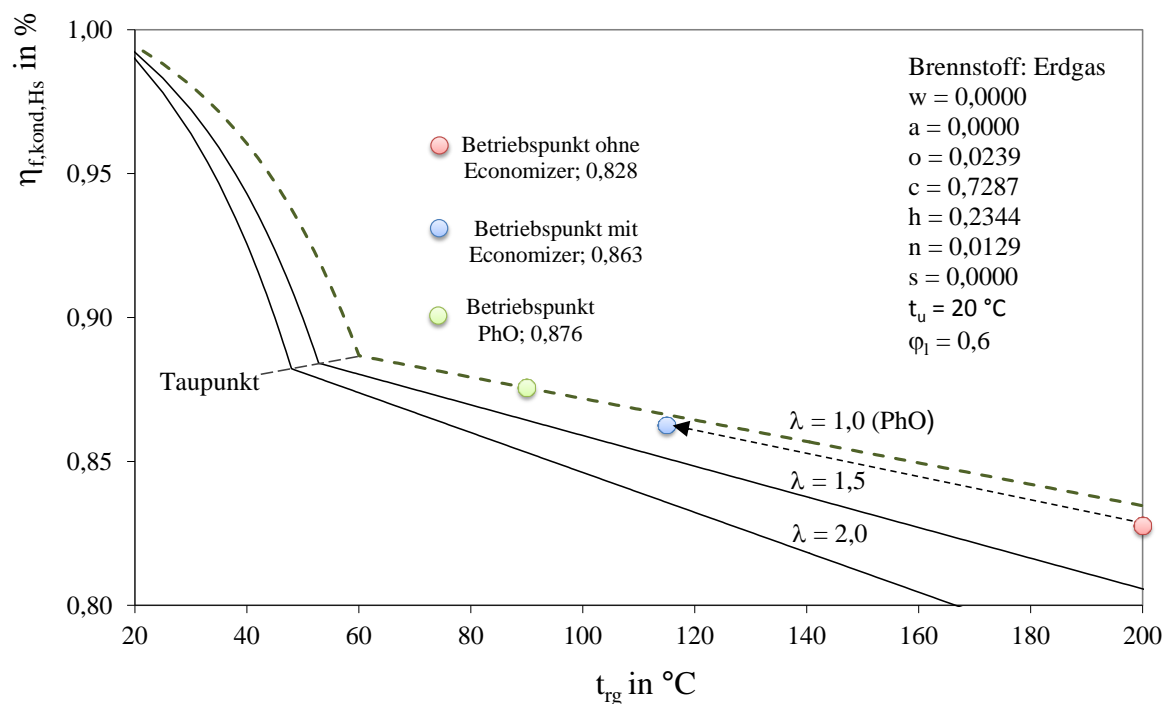


Abbildung A 2.1: Bewertung einer Dampfkesselanlage mit Economiser

Da neben den Abgasverlusten weitere Verluste vorliegen (vgl. Kapitel 4.5.5), welche im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht wurden, wird für die Berechnung des PhO-Faktors ein Kesselwirkungsgrad von 75%-H_S (brennwertbezogen) angesetzt. Der Abgasverlust für den physikalisch optimalen Wärmeerzeuger wird bei $t_{rg} = t_r = 90 \text{ °C}$ angenommen und mittels Abbildung A 2.1 bestimmt ($q_{a,\lambda=1} = 12,4 \%$).

Der PhO-Faktor beträgt nach Gl 4-40 für den Wärmeerzeuger somit:

$$F_{PhO,WE} = \frac{1 - 0,124}{0,75} = 1,17$$

⁶⁷ Die Darstellung des Economiserbetriebes dient der Veranschaulichung einer effizienzsteigernden Maßnahme innerhalb des Diagrammes. Der Betriebspunkt nach dem Economiser wird tatsächlich mittels der Speisewasservorwärmung realisiert, welche in der Bilanz nicht berücksichtigt wurde.

A 2.3 Druckluftherzeugung

Die Versorgung des Werkes mit dem Medium Druckluft ist mittels ölfreien, wassergekühlten Schraubenverdichtern realisiert. Abbildung A 2.2 zeigt den gemessenen Betriebspunkt.

In einer Messung wurde ein spezifischer Energiebedarf von $0,125 \text{ kWh/m}^3_n$ ermittelt⁶⁸. Das Druckniveau lag bei $650 \text{ kPa}_{\text{eff}}$. Der ideale Druckluftverdichtungsprozess würde nach Abbildung A 2.2 $0,0822 \text{ kWh/m}^3_n$ verbrauchen. Daraus ergibt sich ein PhO-Faktor von

$$F_{\text{PhO,DL}}^{\text{DL}} = \frac{w_{\text{gemessen}}}{w_{\text{t,isen}}} = \frac{0,125 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3_n}}{0,0822 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3_n}} = 1,52.$$

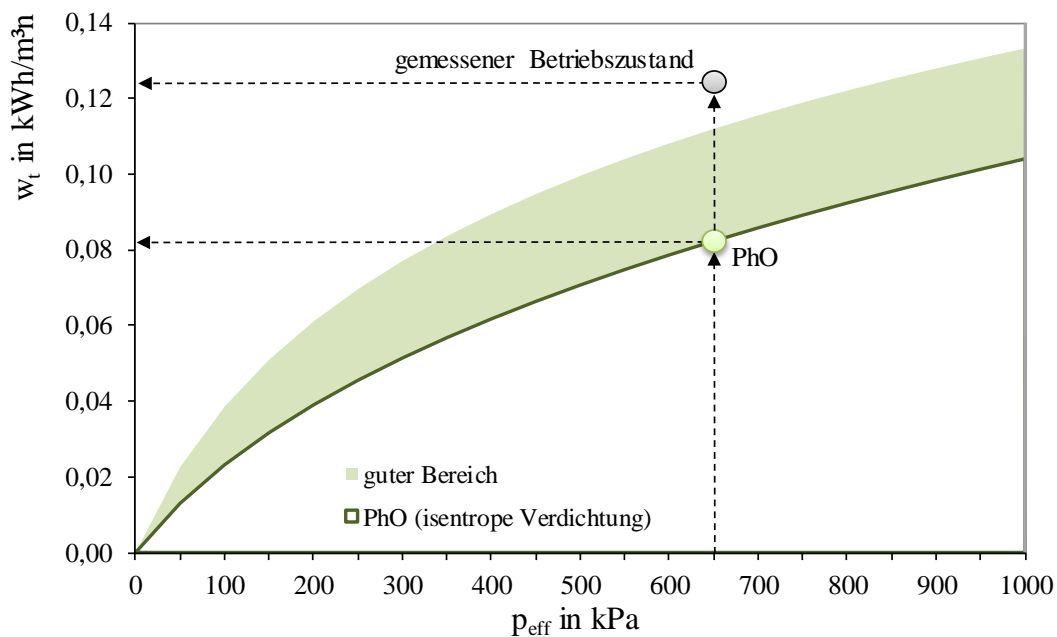


Abbildung A 2.2: Bewertung der Druckluftversorgung

⁶⁸ Der elektrische Energieverbrauch wurde an der Klemmleistung der Verdichteraggregate gemessen, er beinhaltet daher auch einen Verbrauch für die Regelung und die Anzeigeinstrumente. Dass die Messung somit nicht exakt der technischen Arbeit für den Verdichtungsprozess entspricht, wird vernachlässigt.

A 3 Grenzwertbetrachtung für Aufwandszahl und Nutzungsgrad

Für $w_{\text{nutz}} \rightarrow 0$ ist die einfache Grenzwertbetrachtung für die Aufwandszahl e nicht mit einer Lösung innerhalb der Elemente der reellen Zahlen möglich:

$$\lim_{w_{\text{nutz}} \rightarrow 0} (e) = \lim_{w_{\text{nutz}} \rightarrow 0} \frac{w_{\text{auf},0}}{w_{\text{nutz}}} + \left(\frac{1}{\eta_N} - w_{\text{auf},0} \right) = \frac{0}{0} + \frac{1}{\eta_N} - 0 \notin \mathbb{R}$$

Nach der Regel von BERNOULLI-DE L'HOSPITAL kann dieses Problem durch die separate Differenzierung des Zählers und des Nenners gelöst werden:

$$\lim_{w_{\text{nutz}} \rightarrow 0} (e) \stackrel{\text{I'H}}{=} \frac{(w_{\text{auf},0} + w_{\text{nutz}} \cdot \eta_N^{-1} - w_{\text{auf},0} \cdot w_{\text{nutz}})'}{(w_{\text{nutz}})'} = \frac{0 + \eta_N^{-1} - 0}{1} = \frac{1}{\eta_N}$$

Auch der Nutzungsgrad $\bar{\eta}$ führt mit der einfachen Grenzwertbetrachtung für $w_{\text{nutz}} \rightarrow 0$ nicht zu einer Lösung innerhalb der Elemente der reellen Zahlen:

$$\begin{aligned} \lim_{w_{\text{nutz}} \rightarrow 0} (\bar{\eta}) &= \lim_{w_{\text{nutz}} \rightarrow 0} \frac{w_{\text{nutz}}}{\left(\frac{1}{\eta_N} - w_{\text{auf},0} \right) \cdot w_{\text{nutz}} + w_{\text{auf},0}} \\ &= \frac{0}{\left(\frac{1}{\eta_N} - 0 \right) \cdot 0 + 0} = \frac{0}{0} \notin \mathbb{R} \end{aligned}$$

Mit der Regel von BERNOULLI-DE L'HOSPITAL ist der Nutzungsgrad, ebenso wie die Aufwandszahl, für $w_{\text{nutz}} \rightarrow 0$ berechenbar:

$$\begin{aligned} \lim_{w_{\text{nutz}} \rightarrow 0} (\bar{\eta}) &\stackrel{\text{I'H}}{=} \lim_{w_{\text{nutz}} \rightarrow 0} \frac{(w_{\text{nutz}})'}{\left[\left(\frac{1}{\eta_N} - w_{\text{auf},0} \right) \cdot w_{\text{nutz}} + w_{\text{auf},0} \right]}, \\ &= \frac{1}{\left(\frac{1}{\eta_N} - 0 \right) + 0} = \eta_N \end{aligned}$$

A 4 Unterlagen zur Validierung (Werkwasserverbrauch)

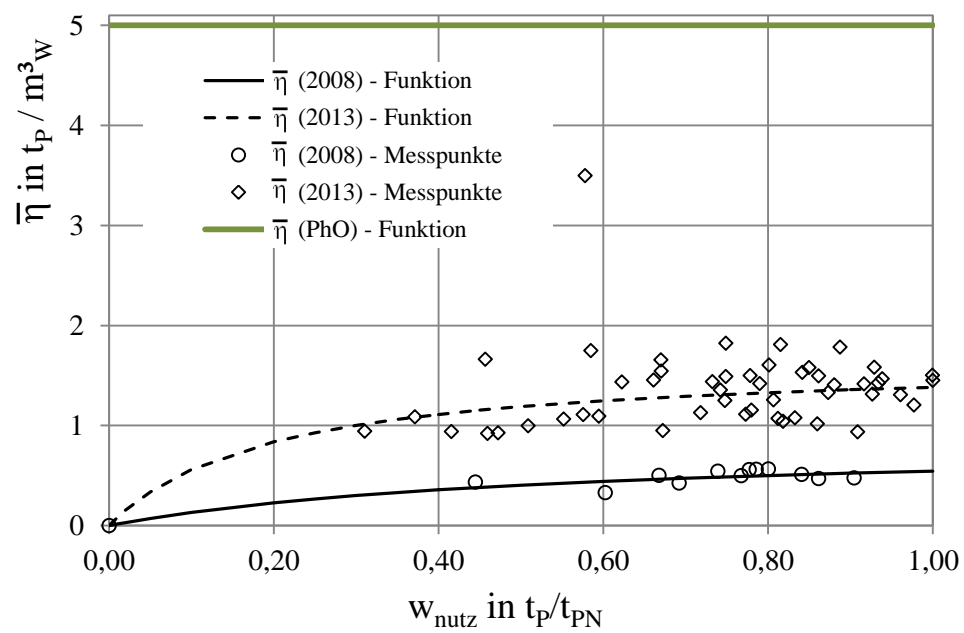


Abbildung A 4.1: Dynamischer Wasserverbrauch einer Fabrik (Nutzungsgrad)

A 5 Unterlagen zur Validierung (des Produktionsprozesses)

A 5.1 Spezifische Wärmekapazität von Rohstoffen

Tabelle A 5.1 zeigt auf Basis von Kapitel 3.3 die Auswertung der Lebensmittelbestandteile eines Schokoladenproduktes. Die Massenanteile der Rohstoffe (Vollmilchschokolade, Cornflakes und Mandeln) sind SOUCI [49] entnommen. Die Summen der Massenanteile sind nach Gl A 5.1 auf 100 % normiert worden:

$$\mu_{i,n} = \frac{\mu_i}{\sum \mu_i}$$

Gl A 5.1

Tabelle A 5.1: Spezifische Wärmekapazität eines Schokoladenproduktes

Parameter:	Formel- zeichen	Wert	Einheit
c _p -Protein	c _{pp}	2.043	J/kg·K
c _p -Fett	c _{pf}	2.024	J/kg·K
c _p -Kohlenhydrate	c _{pk}	1.602	J/kg·K
c _p -Ballaststoffe	c _{pb}	1.900	J/kg·K
c _p -Asche	c _{pa}	1.146	J/kg·K
c _p -Wasser	c _{pw}	4.171	J/kg·K

Eingabewert

Ausgabewert

Nahrungsmittel	Protein	Fett	Kohlen- hydrate	Ballast- stoffe	Asche	Wasser	Summe	
	μ _p	μ _f	μ _k	μ _b	μ _a	μ _w	∑ μ _i	
Vollmilchschokolade	0,0920	0,3150	0,5410	0,0000	0,0220	0,0140	0,9840	
Cornflakes	0,0770	0,0060	0,7780	0,0400	0,0290	0,0570	0,9870	
Mandeln	0,1830	0,5410	0,0930	0,0980	0,0265	0,0565	0,9980	
Nahrungsmittel	Bilanz der auf 100 % normierten Stoffbestandteile (μ _i / ∑ μ _i)							c _{p,ges} in J/kg·K
Vollmilchschokolade	0,093	0,320	0,550	0,000	0,022	0,014	1,000	1.805
Cornflakes	0,078	0,006	0,788	0,041	0,029	0,058	1,000	1.786
Mandeln	0,183	0,542	0,093	0,098	0,027	0,057	1,000	2.074

A 5.2 Ursprünglicher Bestandsprozess

Der Bestandsprozess (vor 2013) zeigt, wie Schokolade von einer Pumpe aus dem Tank in den Temper befördert wird. Der Temper hat die Aufgabe, die Schokolade etwas abzukühlen, um dafür zu sorgen, dass sich Schokoladenkristalle bilden, damit die Schokolade nach der Erstarrung eine feste Struktur bildet. Nach dem Temper passiert die Schokolade eine begleitbeheizte Rohrleitung und wird in einem Mischer mit den Feststoffen vermengt. In der Gießmaschine wird das Schokoladenfeststoffgemisch auf ein Rüttelband gebracht, welches etwa 30 % des Auftrages in einer späteren Kühlung als Fertigprodukt ausbringt. 70 % des Massenstromes fällt durch das Rüttelband und gelangt zurück in den Tank. Dieser Rückfluss kann als Rework bezeichnet werden.

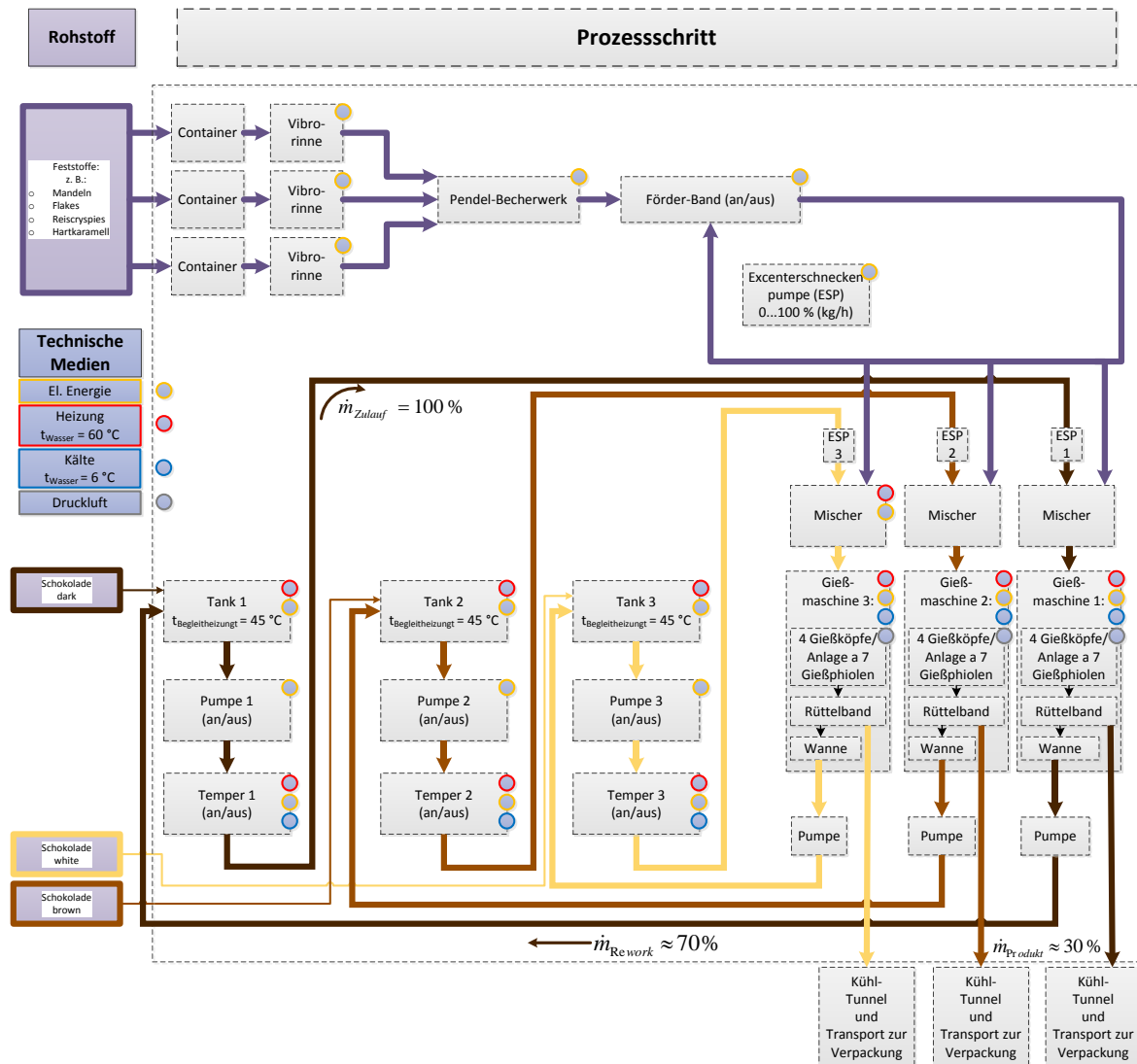
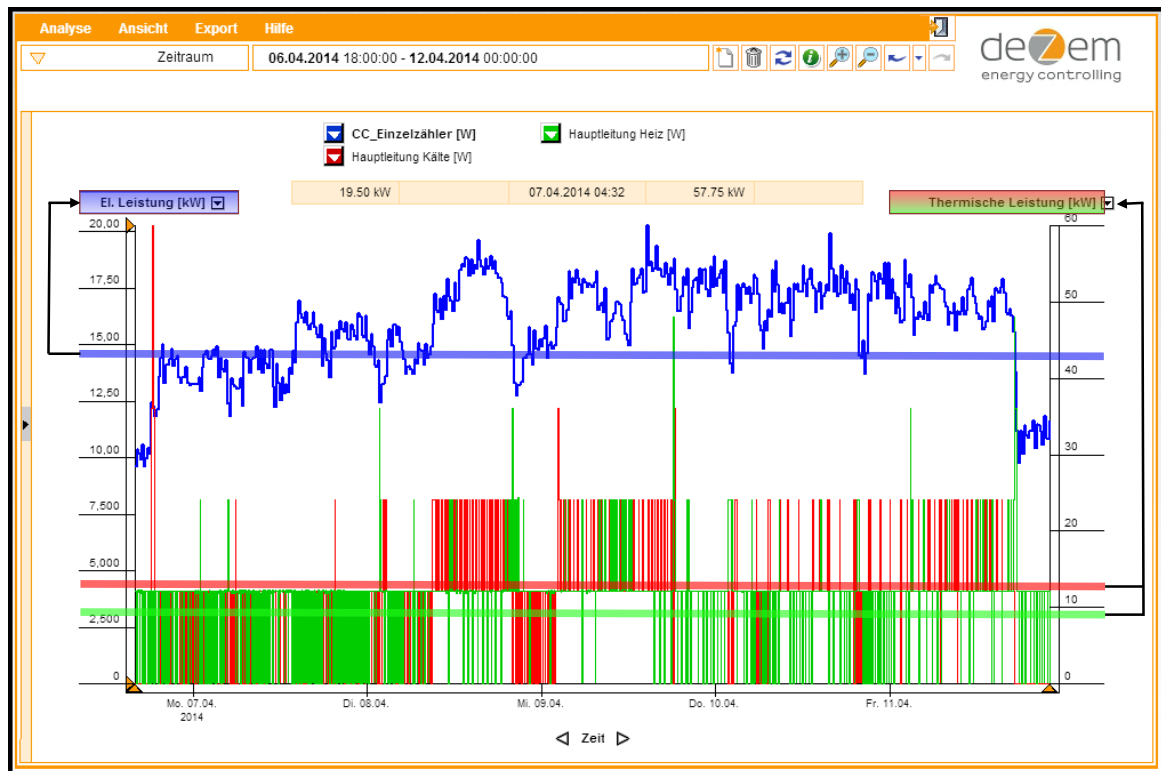


Abbildung A 5.1: Prozessflussbild eines Schokoladenherstellprozesses – Gießmaschine

A 5.3 Messergebnisse (exemplarisch)



Strom = Blau → Trendline des Stromverbrauchs V_{el}^P liegt bei $w_{Nutz=1}$ bei ca. 14,76 kW_{el}

Kälte = Rot → Trendline des Kälteverbrauchs V_K^P liegt bei $w_{Nutz=1}$ bei ca. 10,9 kW_{th,K}

Wärme = Grün → Trendline des Wärmeverbrauchs V_{WE}^P liegt bei $w_{Nutz=1}$ bei ca. 8,156 kW_{th,WE}

Abbildung A 5.2: Energieverbrauch eines Schokoladenproduktes (exemplarisch)

A 5.4 Detailrechnung – Schritt 1 der Systematik aus Kapitel 5.3

Die Validierung, anhand der Herstellung eines Schokoladenproduktes, in Kapitel 6.2 ist auf Basis von Kapitel 5.3 erfolgt. Der erste Schritt dieser Systematik (vgl. Abbildung 5-8) erfordert die Berechnung des Physikalischen Optimums. Das Physikalische Optimum wird im Folgenden für den Produktionsprozess zusammengefasst. Die Berechnung wurde innerhalb einer Excel-Tabelle umgesetzt.

Prozessschritt: 1→2; Kühlen der Rohschokolade			
Parameter	Formelzeichen	Einheit	Wert
Kälteleistung	$Q_{th,K} / \tau$	$V_{PhO,K}^P$ in $W_{th,K}$	4072
Massenstrom Schokolade	m / τ	kg/s	0,188
Spez. Wärmekapazität Schokolade	c_p	J/kg·K	1805
Eintrittstemperatur	t_{in}	°C	45
Austrittstemperatur	t_{out}	°C	33
Prozessschritt: 2→3; Kühlen der Rohschokolade			
Kälteleistung	$Q_{th,K} / \tau$	$V_{PhO,K}^P$ in $W_{th,K}$	1188
Massenstrom Schokolade	m / τ	kg/s	0,188
Spez. Wärmekapazität Schokolade	c_p	J/kg·K	1805
Eintrittstemperatur	t_{in}	°C	33
Austrittstemperatur	t_{out}	°C	29,5
Prozessschritt: 3→4; Heizen der Rohschokolade			
Wärmestrom	$Q_{th,WE} / \tau$	$V_{PhO,WE}^P$ in $W_{th,WE}$	339,3
Massenstrom Schokolade	m / τ	kg/s	0,188
Spez. Wärmekapazität Schokolade	c_p	J/kg·K	1805
Eintrittstemperatur	t_{in}	°C	29,5
Austrittstemperatur	t_{out}	°C	30,5
Prozessschritt: 6→7; Hubarbeit der Mandeln			
Elektrische Energie	P_{el}	$V_{PhO,el}^P$ in W_{el}	0,1102
Massenstrom Mandeln	m / τ	kg/s	0,0104
Hub(höhe) der Mandeln	h	m	1,076
Gravitationskonstante	g	m/s ²	9,81

Prozessschritt: 6→7; Hubarbeit der Cornflakes			
Elektrische Energie	P_{el}	$V_{PhO,el}^P$ in W_{el}	0,6615
Massenstrom Cornflakes	m / τ	kg/s	0,063
Hub(höhe) der Cornflakes	h	m	1,076
Gravitationskonstante	g	m/s^2	9,81
Prozessschritt: 6*→7*; Heizen der Mandeln			
Wärmestrom	$Q_{th,WE} / \tau$	$V_{PhO,WE}^P$ in $W_{th,WE}$	119,1
Massenstrom Mandeln	m / τ	kg/s	0,0104
Spez. Wärmekapazität Mandeln	c_p	J/kg·K	2074
Eintrittstemperatur	t_{in}	°C	25
Austrittstemperatur	t_{out}	°C	30,5
Prozessschritt: 6*→7*; Heizen der Cornflakes			
Wärmestrom	$Q_{th,WE} / \tau$	$V_{PhO,WE}^P$ in $W_{th,WE}$	615,6
Massenstrom Cornflakes	m / τ	kg/s	0,063
Spez. Wärmekapazität Cornflakes	c_p	J/kg·K	1786
Eintrittstemperatur	t_{in}	°C	25
Austrittstemperatur	t_{out}	°C	30,5

Zusammenfassung:

Parameter	Formelzeichen	Einheit	Wert
Summe der Heizleistung	$Q_{th,WE} / m_{PN}$	kWh _{th,WE} /t _{PN}	1,143
Summe der Kälteleistung	$Q_{th,K} / m_{PN}$	kWh _{th,K} /t _{PN}	5,596
Summe der elektrischen Leistung	W_{el} / m_{PN}	kWh _{el} /t _{PN}	0,0008210

Das Ergebnis zeigt den summierten Heiz-, Kälte- und elektrischen Energieverbrauch aller Prozessschritte für den Gesamt-Herstellprozess des Schokoladenproduktes im Nennzustand.

A 5.5 Berechnen der Verlustkaskade

Die Berechnung der Verlustkaskade für die Validierung in Kapitel 6.2 zeigt alle Schritte der Systematik aus Kapitel 5.3 (Abbildung 5-8). Die Rechnung basiert auf den Gleichungen Gl 5-3 bis Gl 5-9 und wurde in einer Excel-Tabelle erstellt.

Zunächst wird beispielhaft die Berechnung der Verlustkaskade für das Technische Medium „Kälte“ durchgeführt. Ausgehend von physikalisch optimalem und gemessenem Kälteverbrauch im Produktionsprozess zur Pralinenherstellung (Schokolade, Mandeln, Cornflakes), wird die Verlustkaskade bis hin zum Primärenergieverbrauch berechnet.

Umrechnungsfaktoren

Die maximale Produktionsmenge unter Nennleistung ist nach Kapitel 6.2

$$\dot{m}_{PN} = 940 \frac{\text{kg}_{PN}}{\text{h} \cdot (2 \text{ Anlagen})} = 0,940 \frac{\text{t}_{PN}}{\text{h}} = 0,2611 \frac{\text{kg}_{PN}}{\text{s}}$$

Da sich die Messungen auf eine Schicht von acht Stunden erstrecken, ergibt sich eine Nenn-Produktionsmenge für eine Schicht von:

$$m_{PN} = \frac{940 \frac{\text{kg}_{PN}}{\text{h}} \cdot 8 \text{ h}}{1000} = 7,52 \text{ t}_{PN}$$

Der Massenstrom des Fertigproduktes resultiert aus den Rohstoffen (Schokolade, Cornflakes und Mandeln):

Nenn-Massenstrom Schokolade	0,1880 kg _{PN} /s
Nenn-Massenstrom Cornflakes	0,0627 kg _{PN} /s
Nenn-Massenstrom Mandeln	0,0104 kg _{PN} /s
Nenn-Massenstrom Produkt	0,2611 kg _{PN} /s

Schritt 1: $V_{PhO,K}^P$

Der PhO-Kältebedarf für den Produktionsprozess ist:

$$\begin{aligned} V_{PhO,K}^P &= \dot{Q}_{PhO,K}^P = c_{p,S} \cdot \dot{m}_S \cdot (T_2 - T_1) \\ &= 1805^{69} \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,1880 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (45,0 - 29,5) \text{ K} = 5,260 \text{ kW}_{th,K} \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich der spezifische PhO-Kältebedarf für den Produktionsprozess:

$$\Rightarrow V_{PhO,K}^P = \frac{\dot{Q}_{PhO,K}^P}{\dot{m}_{PN}} = \frac{5,260 \text{ kW}_{th,K}}{0,940 \frac{\text{t}_{PN}}{\text{h}}} = 5,596 \frac{\text{kWh}_{th,K}}{\text{t}_{PN}}$$

⁶⁹ Angenommener Wert für die spezifische Wärmekapazität von Milkschokolade siehe Tabelle A 5.1.

Schritt 2: V_K^P

Aus den Messungen folgt die lineare Regression für den realen Kälteverbrauch V_K^P in Abhängigkeit der Auslastung w_{Nutz} :

$$V_K^P = 4,0068832519921 \cdot w_{\text{Nutz}} + 7,56607608220011 \frac{\text{kWh}_{\text{th,K}}}{t_{\text{PN}}}$$

Daraus folgt der reale Kälteverbrauch V_K^P bei einer maximalen Auslastung von $w_{\text{Nutz}} = 1$:

$$\Rightarrow V_K^P = 4,0068832519921 \cdot 1 + 7,56607608220011 = 11,57 \frac{\text{kWh}_{\text{th,K}}}{t_{\text{PN}}}$$

Schritt 3: $V_{\text{PhO,K},\text{Äq}}^P$ und $V_{\text{K},\text{Äq}}^P$

Die reale- sowie die berechnete Kälteleistung wird in Schritt 3 mittels des Einheitenäquivalentes nach Tabelle 5-1 umgerechnet. Somit kann das elektrische Verbrauchs-Äquivalent für Kälte sowohl für $V_{\text{PhO,K}}^P$ als auch für V_K^P berechnet werden:

$$\Rightarrow V_{\text{PhO,K},\text{Äq}}^P = V_{\text{PhO,K}}^P \cdot \text{Äq}_K = \frac{V_{\text{PhO,K}}^P}{\varepsilon_K} = \frac{5,596 \frac{\text{kWh}_{\text{th,K}}}{t_{\text{PN}}}}{10,23 \frac{\text{kWh}_{\text{th,K}}}{\text{kWh}_{\text{el,K}}}} = 0,5470 \frac{\text{kWh}_{\text{el,K}}}{t_{\text{PN}}}$$

$$\Rightarrow V_{\text{K},\text{Äq}}^P = \frac{V_K^P}{\varepsilon_K} = \frac{11,57 \frac{\text{kWh}_{\text{th,K}}}{t_{\text{PN}}}}{10,23 \frac{\text{kWh}_{\text{th,K}}}{\text{kWh}_{\text{el,K}}}} = 1,131 \frac{\text{kWh}_{\text{el,K}}}{t_{\text{PN}}}$$

Schritt 4: $F_{\text{PhO,K}}^P$

Aus dem Quotienten des realen Kälteverbrauchs und des physikalisch optimalen Kältebedarfs ergibt sich der PhO-Faktor (siehe Gl 5-4) des Produktionsprozesses $F_{\text{PhO,TM}}^P$ (an dieser Stelle mit den äquivalenten Einheiten berechnet):

$$F_{\text{PhO,K}}^P = \frac{V_{\text{K},\text{Äq}}^P}{V_{\text{PhO,K},\text{Äq}}^P} = \frac{1,131 \frac{\text{kWh}_{\text{el,K}}}{t_{\text{PN}}}}{0,547 \frac{\text{kWh}_{\text{el,K}}}{t_{\text{PN}}}} = 2,068$$

Schritt 5: $V_{EE, TM}^{TM}$ und Schritt 6: $F_{PhO, K}^K$

Der PhO-Faktor für die Technische Medien „Kälte“ $F_{PhO, K}^K$ wurde separat in Kapitel 4.5.4 berechnet und ist zudem in Tabelle 5-1 aufgeführt.

Der reale Endenergieverbrauch eines technischen Mediums berechnet sich nach Gl 5-6 unter Vernachlässigung des Primärenergiefaktors.

$$\Rightarrow V_{EE, K}^K = V_{K, \ddot{A}q}^P \cdot F_{PhO, K}^K = 1,131 \frac{kWh_{el, K}}{t_{PN}} \cdot 3,77 \frac{kWh_{el, K}}{kWh_{el, K}} = 4,265 \frac{kWh_{EE}}{t_{PN}}$$

Schritt 7: $V_{PhO, PE, TM}$ und $V_{PE, TM}$

Der reale Primärenergieverbrauch eines Technischen Mediums $V_{PE, TM}^{TM}$ folgt aus dem Produkt des physikalisch optimalen Bedarfes eines technischen Mediums im Produktionsprozesses $V_{PhO, TM, \ddot{A}q}^P$, den PhO-Faktoren $F_{PhO, TM}^P$, $F_{PhO, TM}^{TM}$ sowie dem Primärenergiefaktor $F_{PE, TM}$ nach Gl 5-6. Der Primärenergiefaktor ist Tabelle 5-1 zu entnehmen.

$$\begin{aligned} \Rightarrow V_{PE, K}^K &= V_{PhO, K, \ddot{A}q}^P \cdot F_{PhO, K}^P \cdot F_{PhO, K}^K \cdot F_{PE, K} \\ &= 0,547 \frac{kWh_{el, K}}{t_{PN}} \cdot 2,068 \frac{kWh_{el, K}}{kWh_{el, K}} \cdot 3,77 \frac{kWh_{el, K}}{kWh_{el, K}} \cdot 2,96 \frac{kWh_{PE}}{kWh_{EE}} = 12,62 \frac{kWh_{PE}}{t_{PN}} \end{aligned}$$

$V_{PhO, PE, TM}^{TM}$ wird dagegen aus dem Produkt des physikalisch optimalen Bedarf eines technischen Mediums eines Produktionsprozesses $V_{PhO, TM}^P$ und dem Primärenergiefaktor $F_{PE, TM}$ des jeweiligen technischen Mediums nach Gl 5-7 gebildet.

$$\Rightarrow V_{PhO, PE, K}^K = V_{PhO, K, \ddot{A}q}^P \cdot F_{PE, K} = 0,547 \frac{kWh_{el, K}}{t_{PN}} \cdot 2,96 \frac{kWh_{PE}}{kWh_{EE}} = 1,62 \frac{kWh_{PE}}{t_{PN}}$$

	Wärme	Kälte	Strom
$F_{\text{PhO,TM}}^{\text{TM}}$	1,17	3,77	1
$F_{\text{PE,TM}}$	1,12	2,96	2,96
Äquivalent	1	0,0978	1

Eingabefelder: Kursiv

Schritt 1: Berechnen des PhO's ($V_{\text{PhO,TM}}^{\text{P}}$)

Nutzenergieverbrauch PhO der Technischen Medien			
w_{Nutz}	$V_{\text{PhO,WE}}^{\text{P}}$ in kWh _{th,WE} /t _p	$V_{\text{PhO,K}}^{\text{P}}$ in kWh _{th,K} /t _p	$V_{\text{PhO,el}}^{\text{P}}$ in kWh _{el} /t _p
0	0	0	0
1E-25	1,143,E-25	5,596,E-25	8,210,E-29
1	1,143	5,596	0,0008210

Schritt 2: Messen des realen Verbrauchs im Produktionsprozess ($V_{\text{TM}}^{\text{P}} = V_{\text{PhO,TM}}^{\text{TM}}$)

Nutzenergieverbrauch real der Technischen Medien			
w_{Nutz}	V_{WE}^{P} in kWh _{th,WE} /t _p	V_{K}^{P} in kWh _{th,K} /t _p	V_{el}^{P} in kWh _{el} /t _p
0	13,26	7,566	13,66
1E-25	13,26	7,566	13,66
1	8,68	11,57	15,70

Schritt 3: Einheiten-Äquivalente herstellen

Nutzenergieverbrauch real der Technischen Medien – Äquivalent			
w_{Nutz}	V_{WE}^{P} in kWh _{th,WE} /t _p	$V_{\text{K,Äq}}^{\text{P}}$ in kWh _{el,K} /t _p	V_{el}^{P} in kWh _{el} /t _p
0	13,26	0,7396	13,66
1E-25	13,26	0,7396	13,66
1	8,676	1,131	15,70
Nutzenergieverbrauch PhO der Technischen Medien – Äquivalent			
w_{Nutz}	V_{WE}^{P} in kWh _{th,WE} /t _p	$V_{\text{PhO,K,Äq}}^{\text{P}}$ in kWh _{el,K} /t _p	V_{el}^{P} in kWh _{el} /t _p
0	0	0	0
1E-25	1,143,E-25	5,470,E-26	8,210,E-29
1	1,143	0,5470	0,0008210

Schritt 4: Berechnen des Faktors der technischen Medien ($F_{\text{PhO,TM}}^{\text{P}}$)

w_{Nutz}	$F_{\text{PhO,WE}}^{\text{P}}$	$F_{\text{PhO,K}}^{\text{P}}$	$F_{\text{PhO,el}}^{\text{P}}$
0	∞	∞	∞
1E-25	1,160E+26	1,352E+25	1,664E+29
1	7,593	2,068	19.128

Schritt 5: Berechnen des Energieverbrauches des TM ($V_{EE,TM}^{TM}$)

Endenergieverbrauch real der Technischen Medien			
w_{Nutz}	$V_{EE,WE}^{WE}$ in kWh _{th,WE} /t _P	$V_{EE,K}^K$ in kWh _{el,K} /t _P	$V_{EE,K}^{el}$ in kWh _{el} /t _P
0	15,51	2,788	13,66
1E-25	15,51	2,788	13,66
1	10,15	4,265	15,70

Schritt 7: Primärenergetische Bewertung des Gesamtprozesses (V_{PE})

Gesamt-Primärenergieverbrauch real			
w _{Nutz}	ΣV _{PE,TM} der genutzten TM im Prozess in kWh _{PE,TM} /t _P		
0	0/0 (→deshalb Grenzwertbetrachtung an der Stelle 1E-25) ⁷⁰		
1E-25	66,1		
1	70,5		
Gesamt Primärenergieverbrauch PhO			
w _{Nutz}	ΣV _{PhO,PE,TM} der genutzten TM im Prozess in kWh _{PE,TM} /t _P		
0	0/0 (→deshalb Grenzwertbetrachtung an der Stelle 1E-25)		
1E-25	2,901E-25		
1	2,90		
Primärenergieverbrauch real der Technischen Medien			
w _{Nutz}	V ^{WE} _{PE,WE} in kWh _{PE,WE} /t _P	V ^K _{PE,K} in kWh _{PE,K} /t _P	V ^{el} _{PE,el} in kWh _{PE,el} /t _P
0	0/0 (→deshalb Grenzwertbetrachtung an der Stelle 1E-25)		
1E-25	17,37	8,25	40,43
1	11,37	12,62	46,48
Primärenergieverbrauch PhO der Technischen Medien			
w _{Nutz}	V _{PhO,PE,WE} in kWh _{PE,WE} /t _P	V _{PhO,PE,K} in kWh _{PE,K} /t _P	V _{PhO,PE,el} in kWh _{PE,el} /t _P
0	0	0	0
1E-25	1,280E-25	1,619E-25	2,430E-28
1	1,280	1,62	0,002430

$F_{PhO,PE}$	24,3	kWh _{PE} / kWh _{PhO}	(nach Gl 5-5)
$F_{PhO,PE}^*$	41,7	kWh _{PE} / kWh _{PhO,PE}	(nach Gl 5-8)

⁷⁰ Die Berechnung von V_{PE} (siehe Gl 5-6) ist im physikalischen Optimalfall nicht möglich, wenn $V_{PhO} = 0$ und $F_{PhO} = \infty$ ist. Daher wurde in der Auswertung das Problem an der Stelle $w_{nutz} = 10^{-25} \approx 0$ untersucht.

A 5.6 Auswertung Nutzenergieverbrauch (dynamisch)

Um die Fabrik auf ihr dynamisches Verhalten zu untersuchen, wurde die Systematik des normierten Aufwands (vgl. Kapitel 5.5) in Verbindung mit der Systematik zur Bilanzierung unterschiedlicher Energieformen (vgl. Kapitel 5.3) angewendet.

Der normierte Aufwand wurde in einem ersten Schritt auf Basis der Nutzenergieverbräuche ausgewertet. Abbildung A 5.3 zeigt das Ergebnis, wobei diese im ersten Schritt der Visualisierung der Messergebnisse dienen soll. In einem weiteren Schritt – der Umrechnung der Ergebnisse auf Primärenergiebasis – werden die Verbräuche vergleichbar.

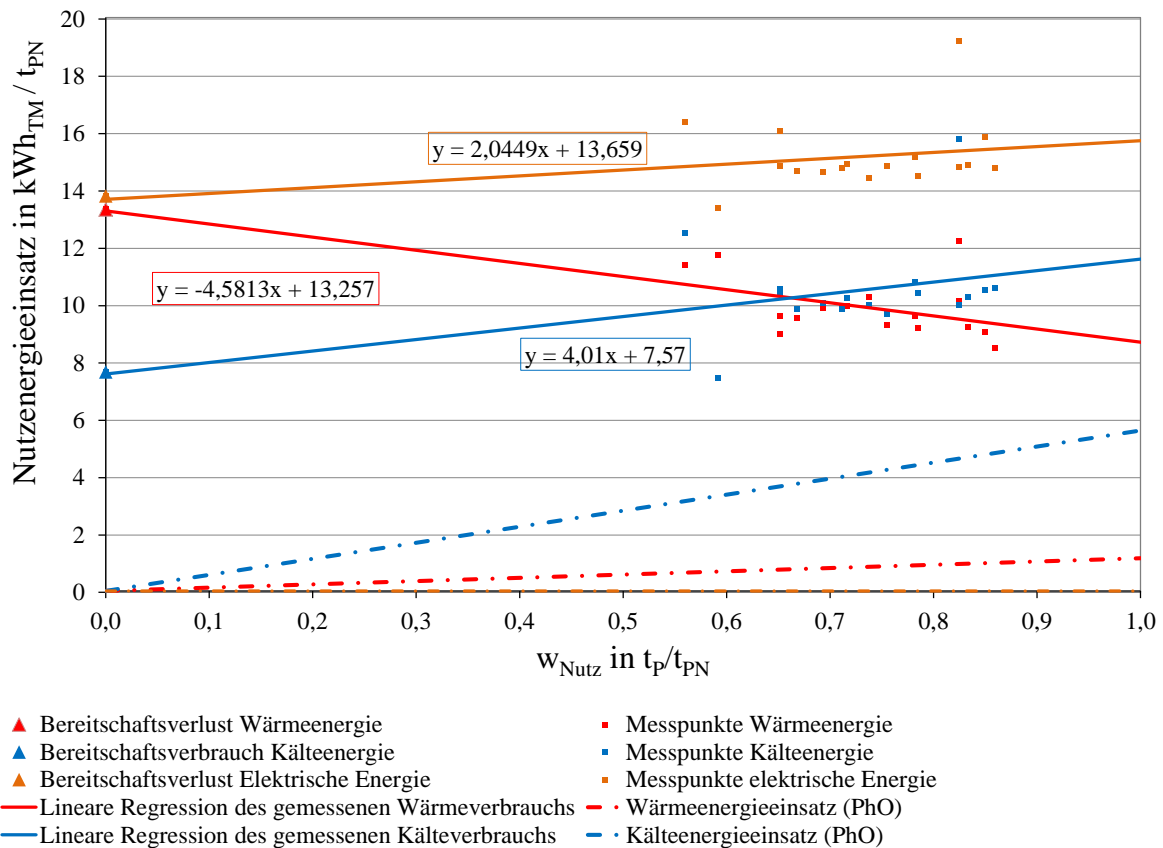


Abbildung A 5.3: Normierter Nutzenergieaufwand eines Schokoladenherstellprozesses

A 5.7 Auswertung Primärenergieverbrauch (dynamisch)

In einem weiteren Schritt wurde das Ergebnis auf den Primärenergieverbrauch bezogen und in Abbildung A 5.4 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass der Aufwand (Summe des Primärenergieverbrauches) relativ unabhängig von der Produktionsauslastung ist. Der Bereitschaftsverlust ist somit sehr hoch.

In der Detailbetrachtung der einzelnen Technischen Medien ist zu erkennen, dass dieser Umstand sowohl durch den Kälteenergieverbrauch, als auch durch den Verbrauch an elektrischer Energie begründet ist. Der Wärmeenergieverbrauch trägt einen überproportional großen Anteil zu den hohen Bereitschaftsverlusten bei, da der Bereitschaftsverbrauch sogar höher ist als der Verbrauch im Produktionsbetrieb. Das liegt daran, dass sämtliche Begleitheizprozesse während des Stillstandes betrieben werden, um die Schokolade nicht einfrieren zu lassen. Der Bereitschaftsheizbetrieb erfolgt im Mittel auf einem höheren Temperaturniveau (45 °C) als im Produktionsbetrieb. Insbesondere die Schokoladenleitung vom Temper zum Mischer (vgl. Abbildung 6-9) verbraucht während des Produktionsbetriebes (Sollwert: 30,5 °C) weniger Wärmeenergie als im Bereitschaftsbetrieb (Sollwert: 45 °C).

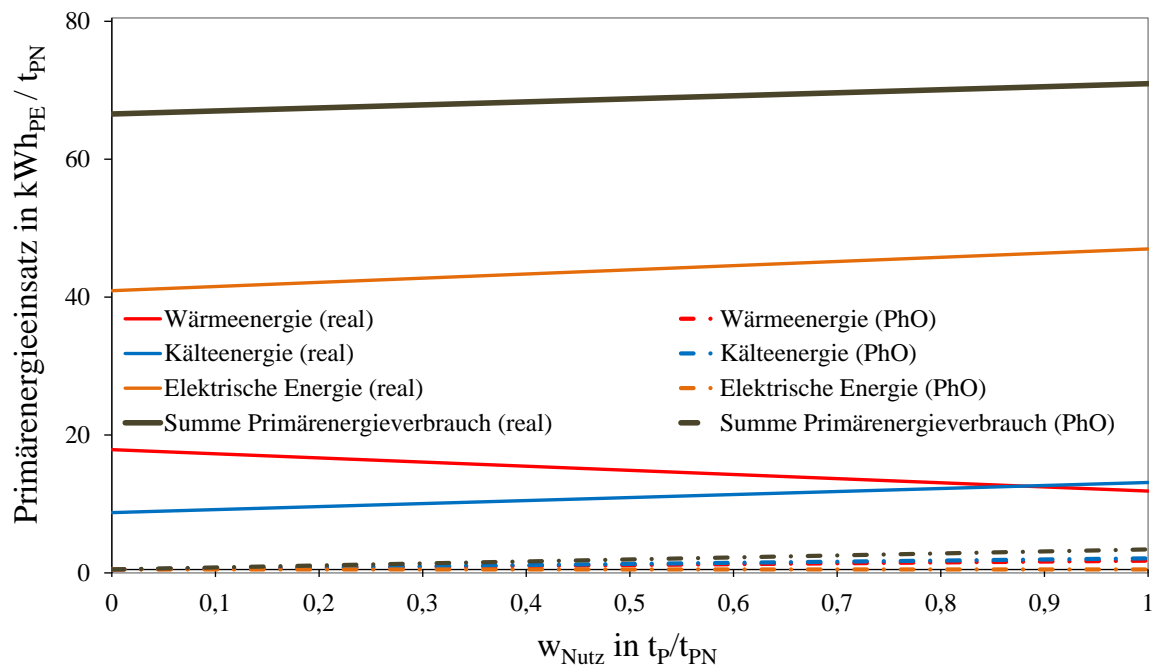


Abbildung A 5.4: Normierter Primärenergieaufwand eines Schokoladenherstellprozesses

Wird bei einer Produktionsauslastung von 100 % der reale Primärenergieverbrauch mit dem Primärenergieverbrauch im physikalischen Optimalfall verglichen, ergibt sich nach Gl 5-5 ein PhO-Faktor⁷¹ von 24,3.

⁷¹ $F_{\text{PhO,PE}} = \frac{V_{\text{PE}}}{V_{\text{PhO,PE}}} = \frac{70,5}{2,9} = 24,3$